• NUMERO MONOGRAFICO •

# INVESTIGACION y CIENCIA

NOVIEMBRE 2004
5,50 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

# LO QUE DEBEMOS A EINSTEIN

## EL LEGADO DEL OFICIAL DE PATENTES:

- APLICACIONES PARA EL SIGLO XXI
- EINSTEIN Y LA FISICA CUANTICA
- LA CONSTANTE COSMOLOGICA
- LA TEORIA DE CUERDAS
- UNIFICACION DE LAS FUERZAS






Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Noviembre de 2004

Número 338







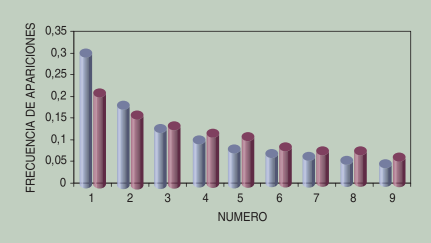






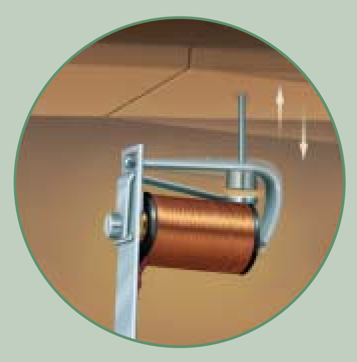




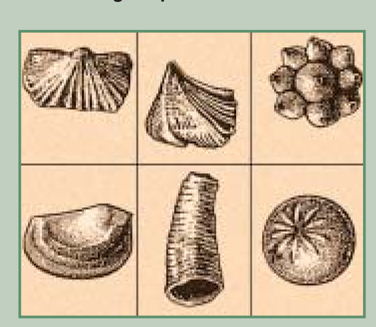


FRECUENCIA DE APARICIONES
0,35
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
NUMERO










DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

**SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

**DISTRIBUCION**

**para España:**

**LOGISTA, S. A.**
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

**para los restantes países:**

**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

**PUBLICIDAD**

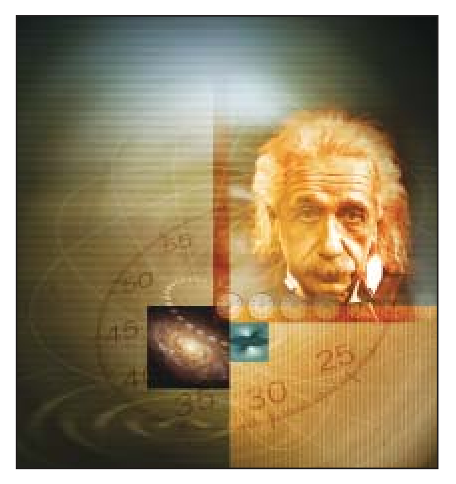
Madrid:
GM Exclusivas Publicidad
Menorca, 8, Bajo, Centro Izda.
28009 Madrid
Tel. y Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

**COLABORADORES DE ESTE NUMERO**

**Asesoramiento y traducción:**

Luis Bou: *Nuestro Einstein cotidiano, Aplicaciones de la física moderna para el siglo XXI, La unificación de las fuerzas* y *Einstein y Newton*; José Chabás: *La brújula de Einstein*; Ramón Pascual: *La constante cosmológica*; A. Garcimartín: *El paisaje de la teoría de cuerdas*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes, ¿Estaba Einstein en lo cierto?, Búsqueda de violaciones de la relatividad, Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*

**Portada:** Tom Draper Design; Philippe Halsman (*fotografía de Einstein*), © 1947 Philippe Halsman Estate


**SUSCRIPCIONES**

**Prensa Científica S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

**Precios de suscripción:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 60,00 euro | 110,00 euro |
| Extranjero | 85,00 euro | 160,00 euro |

**Ejemplares sueltos:**

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.








ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



# HACE

## ...cincuenta años

**CORTEJO ANIMAL.** «Cuando el macho de faisán dorado despliega su brillante plumaje ante la hembra, acostumbramos a decir que la está cortejando. Sin embargo, aplicada a no humanos, el significado de esta expresión no está nada claro; la idea resulta tan antropomórfica que los zoólogos se muestran reacios a utilizarla en la descripción de las así llamadas actividades 'nupciales' de los animales. Pero tan extrañas, y a menudo grotescas, actividades están ahí, lo mismo que el Everest; así que algunos de nosotros nos hemos propuesto investigarlas. Comparadas con alimentarse, huir de los depredadores u otros comportamientos que responden a una clara motivación, las posturas de cortejo de los animales resultan absolutamente enigmáticas, pues es difícil hallar las razones que las causan, e incluso las funciones que desempeñan. —N. Timbergen» [*Nota de la redacción: Nikolaas Timbergen ganó el premio Nobel de fisiología y medicina en 1973.*]

**ANTICUERPOS.** «Mi colega el microbiólogo australiano Frank Fenner y yo sugeríamos en 1949 una nueva teoría sobre la producción de anticuerpos. Se la conoce por hipótesis del automarcador. Se trata de una propuesta provisional, pues presupone sucesos de los que sólo existen vagos indicios. Declara que las células depuradoras del cuerpo (técnicamente, las células del sistema retículo-endotelial) cuentan con ciertas estructuras que nosotros llamamos 'unidades de reconocimiento'. Esas unidades reconocen una gama limitada de 'automarcadores'. El reconocimiento se da simplemente en virtud de un patrón estructural complementario —como el que opera entre la llave y su cerradura, o entre una enzima y la molécula con la que se une.—Sir Macfarlane Burnet» [*Nota de la redacción: Burnet ganó el premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1960.*]

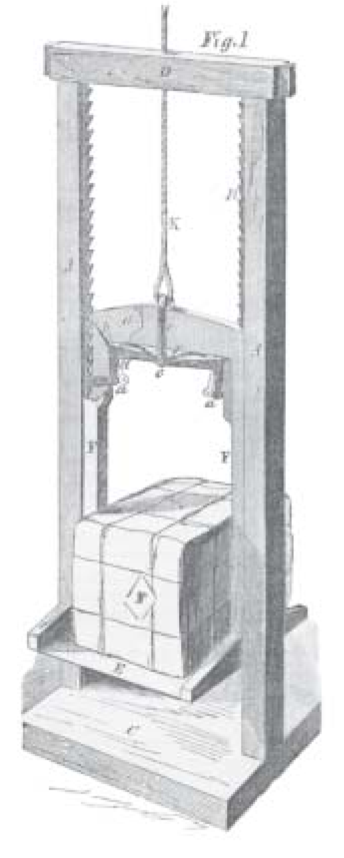
## ...cien años

**ULTIMO MODELO EN CAÑAS DE PESCAR.** «Las cañas de pescar de acero han alcanzado tal grado de perfección, que ya se venden en grandes cantidades, reemplazando a las de bambú. Más fáciles de transportar, mejor equilibradas y más sensibles, se adaptan a los gustos más exigentes. Se fabrican con tubo de acero templado de la mejor calidad, lacado.»

**ETER CÓSMICO.** «En la revista *Knowledge*, miss Agnes Clerke escribe: 'La gloria del firmamento es transitoria, pero el éter, intangible e invisible, permanece sin que sepamos por qué. Tal como es hoy era ya cuando el *Fiat Lux* se pronunció; su principio tiene que haber sido coetáneo con el del tiempo. Elude la percepción común y dificulta el escrutinio delicado. No detiene, ni absorbe, ni dispersa la luz, al menos de forma perceptible. Mirando, empero, bajo la superficie de las cosas, hallamos que esa semifabulosa quintaesencia realiza sin trabas todas las labores del mundo. En ella se enraízan todas las potencias de la materia; en ella está latente la sustancia de la materia.'»

## ...ciento cincuenta años

**¿ESTAMOS SOLOS?** «Sir David Brewster, quien supone habitadas las estrellas, al ser 'la esperanza de los cristianos', pregunta: '¿Es necesario que un alma inmortal penda de un esqueleto óseo? ¿Debe ver con dos ojos, descansar sobre un par de extremidades? ¿Por qué no puede tener asiento en un Polifemo con un globo ocular, o en un Argos con un centenar? ¿Por qué no puede reinar en la gigante complexión de los Titanes y mover las cien manos de Briareo?' Suponiendo que sea así, ¿qué tiene tampoco que ver con la esperanza de los cristianos? Nada en absoluto. Especular así sobre las ciencias físicas, independientemente de cualquier prueba sólida de una u otra índole, así como arrastrar a la religión hacia tales controversias, ni honra al Autor de la religión, ni añade un solo laurel a la guirnalda de las ciencias. Ni seremos tampoco nunca capaces de decir si Marte o Júpiter albergan un solo objeto viviente.»




El ascensor de Otis, para su mayor seguridad, 1854.

**EL ASCENSOR DE SEGURIDAD.** «La figura anexa corresponde a una perspectiva del ascensor perfeccionado de Elisha G. Otis, de Yonkers (Nueva York), quien ya se ha asegurado la patente. Consta de una plataforma unida a un bastidor que se mueve entre dos cremalleras verticales; la parte superior del bastidor cuenta con unos linguetes que se enganchan a las cremalleras cuando cesa la fuerza que sostiene y eleva el ascensor. Merced a esta mejora, si se rompe la cuerda, la plataforma queda sujeta, sin posibilidad de accidente ni heridas, pues se impide la caída del peso. Este excelente ascensor de plataforma se exhibió en el Palacio de Cristal durante la temporada pasada. Causó gran admiración.»

# APUNTES

GENETICA

## Secuencias invasoras

Las mitocondrias, las centrales de energía de las células, poseen su propio ADN, prueba de que sus antepasados antaño vivieron libres y colonizaron las células. Puede que aún sigan actuando como invasoras. Investigadores del Instituto Pasteur de París han descubierto en el genoma del núcleo celular humano 211 fragmentos de ADN coincidentes con secuencias de las mitocondrias. Conjeturan que se integraron erróneamente durante las actividades rutinarias de restauración del ADN. Tal invasión genética parece seguir en curso, pues 27 de esos fragmentos son privativos del *Homo sapiens*; tienen que haber colonizado los cromosomas después de que los humanos divergieran de los demás primates, es decir, en los últimos cuatro, cinco o seis millones de años. Esa inclinación del ADN mitocondrial a alojarse en los genes nucleares podría causar enfermedades; algunos fragmentos provocaron la mutación de genes supresores de tumores. Esa invasión de ADN mitocondrial podría también contribuir al rastreo de las migraciones y evolución humanas, ya que los grupos étnicos poseen sus propias mezclas de fragmentos.

—*Charles Choi*



Las mitocondrias podrían haber invadido no sólo las células, sino incluso sus núcleos.

P. MOTTA Y T. NAGURO/SCIENCE PHOTO LIBRARY

GEOLOGIA

## El interior de la Tierra

No podemos extraer muestras del interior de la Tierra; sólo deducir de qué está hecho. La información se busca en las rocas ígneas (volcánicas) o metamórficas (que se han transformado tras haber sufrido altas presiones y temperaturas bajo la superficie); también, en las variaciones tridimensionales de la velocidad de las ondas sísmicas.

Francis Birch, eminente geofísico ya fallecido, creó con sus colaboradores los métodos que coordinan todos esos datos. Estudió cómo se modifica la rigidez de las rocas cuando experimentan las presiones y temperaturas extremas propias de los interiores planetarios. Como la velocidad de las ondas sísmicas depende de esa rigidez, de un mapa de velocidad sísmicas podremos inferir temperaturas y composiciones. Buena parte de lo que sabemos acerca de los patrones convectivos a gran y pequeña escala, los motores de la tectónica de placas, procede de mediciones indirectas de la temperatura y la composición del tipo de las concebidas por Birch.

Distintas misiones a la Luna y Marte han instalado sismómetros allí. Antes de que dejasen de funcionar nos han proporcionado información, apasionante pero limitada. Casi todas las misiones que aterrizarán en planetas llevarán instrumentos sismológicos; algunas podrán incluso traer piedras a la Tierra.

—*Arthur Lerner-Lam*, Universidad de Columbia



NEUROBIOLOGIA

## Misterios auditivos

El hemisferio izquierdo del cerebro suele procesar los sonidos del habla y el derecho, los cambios de tono. Nuevos estudios con bebés indican que los oídos podrían determinar la especialización auditiva del cerebro. En concreto, es innato al oído derecho (correspondiente al hemisferio izquierdo) que su reacción a las variaciones de sonido rápidas sea más viva que la del oído izquierdo, que prefiere los tonos. Las audiólogas Yvonne Sininger, de la Universidad de California en Los Angeles, y Barbara Cone-Wesson, de la Universidad de Arizona, expusieron unos bebés a chasquidos y a pares de notas por ambos oídos, y recogieron la amplificación ecoica de la energía acústica debida a las células ciliares de la cóclea. El oído derecho tendía a amplificar los chasquidos, que recuerdan al habla, y el izquierdo amplificaba los tonos, pese a que las zonas auditivas del cerebro están infradesarrolladas en los bebés.

—*J. R. Minkel*



Por ese oído entran las notas

NICK KELSH *Corbis*

## ENTOMOLOGIA

# Servicios de información



CHRISTIAN KÖNIG

La colonia ante todo: las obreras reprimen a sus análogas que quieran transmitir sus genes.

En algunas especies de insectos sociales, las obreras se vigilan mutuamente para que ninguna ponga sus propios huevos y deje de cuidar los puestos por la reina. Se suponía que tal práctica se seguía en los nidos que albergan reinas o machos múltiples; en ese caso las obreras tienen menos genes comunes por término medio y salen ganando con la dedicación a la más cercana. Pero un repaso de las investigaciones efectuadas con 50 especies de hormigas, abejas y avispas ha descubierto que en nidos bastante endogámicos es tan probable la persecución de los individuos díscolos como en los más exogámicos. Señalan los investigadores, Robert Hammond y Lauren Keller, de Lausana, que habrá también controles si una conducta fraudulenta le resulta gravosa al nido; ocurriría en el caso de que reinase confusión acerca de los linajes. Parece, pues, que el impulso hacia la eficacia pesa más que el parentesco en el proceso que lleva a la vigilancia. *—J. R. Minkel*

## EXTRATERRESTRES

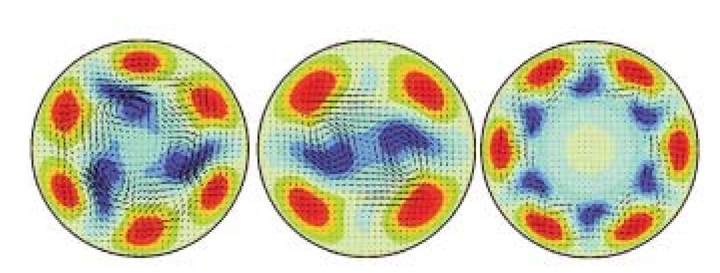
# Recados en órbita

No tendría E.T. que haber telefoneado a casa. Hubiera hecho mejor escribiendo. La busca de inteligencia extraterrestre rastrea el firmamento para captar radio-mensajes, pero las ondas se debilitan al cruzar el espacio. Calculan Christopher Rose y Gregory Wright en *Nature* que emitir algo más que un mero tono hacia el espacio interestelar requiere una antena del tamaño de la Tierra; por lo menos si la señal es de microondas. Por otra parte, calculan que dentro de un gramo de materia podrían inscribirse, mediante microscopía de barrido de efecto túnel, unos diez trillones de bits de datos nanométricos, o sea, toda la información actualmente existente en la Tierra, bien escrita o en soporte electrónico. Por tanto, el correo interestelar resultaría mucho más eficiente para largas distancias, aunque también mucho más lento. No son partidarios de rastrear posibles radioemisiones por la galaxia. Sugieren que quizá sería más fácil hallar mensajes extraterrestres, con soportes materiales, en órbitas próximas a la Tierra, la Luna, el cinturón de asteroides y el Sol; también, en superficies del sistema solar interno, lugares de órbitas muy estables. *—Charles Choi*

## FISICA

# Turbulencia entubada

Al abrir un grifo y aumentar el caudal poco a poco, llega un momento en que el chorro regular y límpido de agua se enturbia de pronto. Tras más de un siglo desde los primeros experimentos sobre este fenómeno, se sigue sabiendo poco del mecanismo que crea y mantiene la turbulencia en el interior de las tuberías. Las simulaciones han sugerido que los elementos básicos constituyentes de ese flujo turbulento podrían ser ondas de remolino que se mueven a favor de la corriente. Ondas que nunca se han observado. Ahora, un grupo dirigido por investigadores de la Universidad Tecnológica de Delft lo ha logrado iluminando con láser un flujo turbulento mientras unas cámaras seguían el movimiento dentro del agua de unas cuentas trazadoras microscópicas. Las cuentas revelaron líneas de vórtices que impulsaban agua lentamente hacia el centro del conducto y generaban así una vena fluida lenta por el centro y venas rápidas alrededor: el remolino predicho. *—J. R. Minkel*



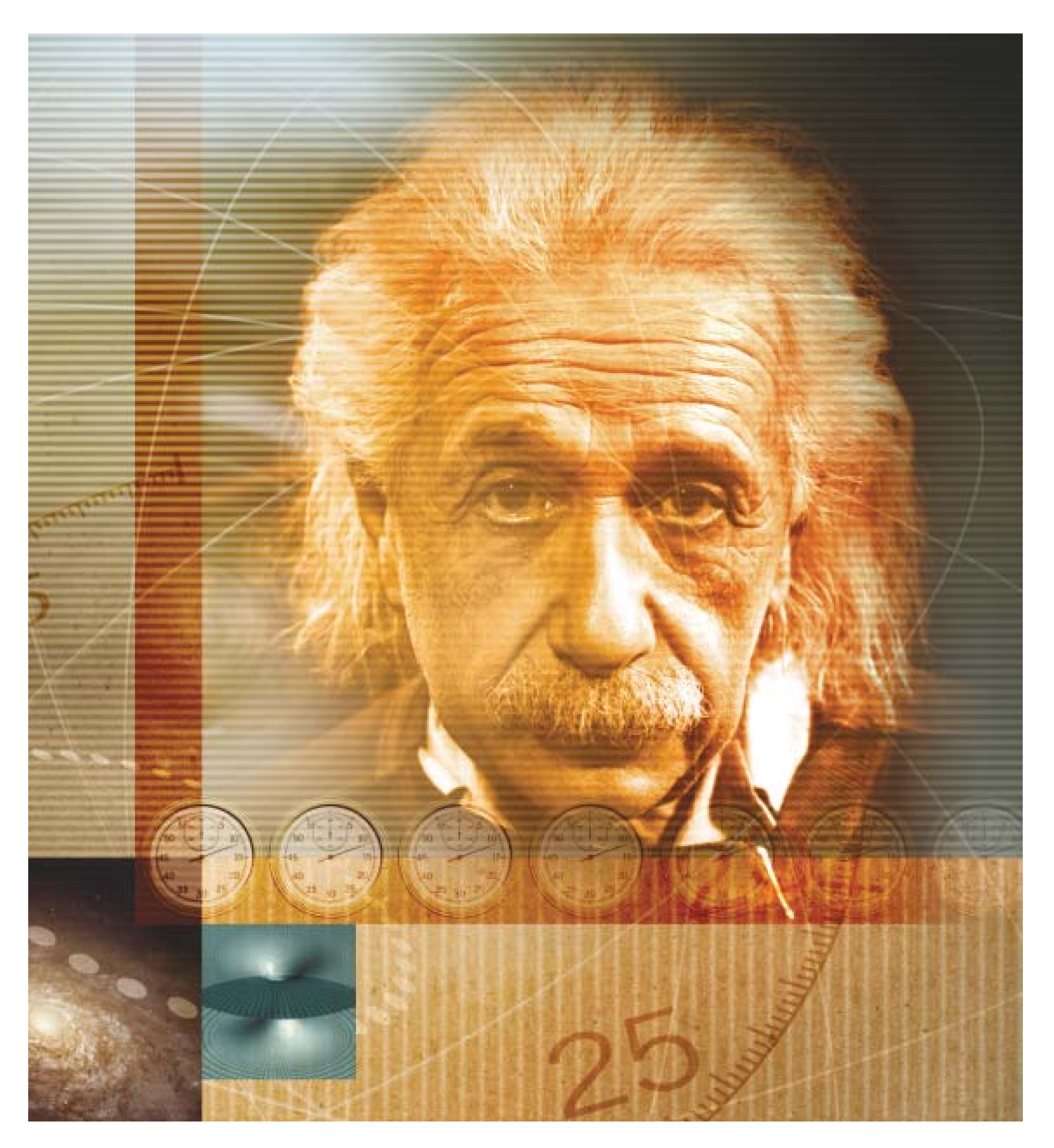
El agua de las tuberías se enturbia a causa de torbellinos formados por flujos rápidos (*rojo*) y lentos (*azul*).

CASIMIR VAN DOORNE Y BJÖRN HOF, REIMPRESO CON PERMISO DE B. HOF ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 305; ©2004, AAAS

## Fe de erratas

– En el artículo "Vuelve Freud", de julio, la frase de la pág. 56 "no se trata de demostrar si Freud estaba o no en lo cierto, sino de concluir la tarea" debe atribuirse a Fred Guterl.
– En el artículo de agosto "El disco de Nebra, ¿un calendario agrícola?", se corrompió una frase de la pág. 83, la que empieza "Dado que las estrellas fijas...". Debe decir: "En el mejor de los casos, serán visibles cerca del horizonte sólo las más brillantes de las estrellas fijas, pues allí la luz debe atravesar unas 35 veces la masa de aire que atraviesa cuando se hallan en el zenit."
– En la sección "Ideas aplicadas" de septiembre, las 395 toneladas del submarino USS Miami se refieren al peso muerto. Su desplazamiento total es de 6146 toneladas.

# El legado del oficial




TOM DRAPER DESIGN; FOTOGRAFIA DE EINSTEIN POR PHILIPPE HALSMAN, ©1947 PHILIPPE HALSMAN ESTATE

# de patentes

**En 1905, las cavilaciones de un funcionario de la oficina de patentes suiza cambiaron para siempre la concepción del universo. Su legado intelectual perdura en una nueva generación de físicos que compiten por elaborar una teoría del todo**

Gary Stix

La figura emblemática de Albert Einstein sobresale entre los físicos del siglo XX. Su trabajo trastornó definitivamente nuestra concepción del mundo natural. El mismo pidió perdón a Newton al darse cuenta de que su teoría de la relatividad borraba las concepciones absolutas del espacio y del tiempo que dos siglos antes aquél había adoptado como principios rectores de la física.

A sus 26 años, este modesto empleado, que se dedicaba a la física en sus ratos libres y a hurtadillas en la oficina, cuyo bagaje se reducía a poco más que una tesis doctoral rechazada unos años antes, se atrevió a declarar que los físicos de su tiempo "no se enteraban de nada" y se dispuso a demostrarlo. Además de proclamar las teorías de la relatividad especial y la relatividad general, su trabajo impulsó la mecánica cuántica y la mecánica estadística moderna. La química y la biotecnología deben a Einstein trabajos que mostraron la existencia de moléculas y su comportamiento.

Para mayor asombro, muchos de estos hallazgos aparecieron en una serie de artículos en un mismo año milagroso: 1905. Ningún otro período ha resultado tan fecundo en logros científicos individuales, a excepción del de 1665 a 1666, *annus mirabilis* en el que Isaac Newton, refugiado en su casa de campo para escapar de la peste, sentó las bases del cálculo integral, la ley de gravitación y la teoría de los colores. Para conmemorar el centenario de las revolucionarias aportaciones de Einstein, la comunidad física internacional ha señalado el 2005 Año Mundial de la Física.

En el transcurso del siglo XX, numerosos físicos e ingenieros se dedicaron a comprobar, materializar y aplicar conceptos derivados de los trabajos de Einstein. Pensemos, por ejemplo, en la conocida fórmula $E = mc^2$, crucial para el desarrollo de la bomba atómica y el curso posterior de la historia. Su explicación del efecto fotoeléctrico hizo posible el desarrollo de un gran número de aplicaciones: de los fotodiodos a los tubos de cámaras de televisión. Un siglo después, la tecnología sigue recogiendo frutos de las teorías de Einstein.

La huella de un genio puede medirse, entre otros parámetros, a partir del tiempo que se necesita para explorar, mediante la experimentación, todas las implicaciones de sus aportaciones teóricas. En ese sentido, la de Einstein todavía perdura. En fecha reciente, se lanzó una sonda espacial con el fin de verificar varias predicciones de la relatividad general. Pero los físicos no esperan a que se comprueben todas las cuestiones; afanados, siguen adelante. Gran parte de los trabajos más sugestivos de la física actual aspiran a llegar más allá de Einstein, a trascender sus concepciones y dar cima a una tarea semejante a la que éste dedicó, aunque sin éxito, los últimos treinta años de su vida.

La relatividad general y la física de partículas no ofrecen una descripción completa de la física; la última corresponde, en esencia, a la mecánica cuántica, y ésta no acaba de compadecerse con la relatividad general. Pese a consagrarle decenios enteros, Einstein nunca halló un marco teórico que uniera la relatividad con el electromagnetismo. Confiaba en formular una física basada en la certeza, no en la probabilidad ni la acausalidad de la mecánica cuántica —implicaciones epistemológicas que le apartaron de un dominio que él mismo había contribuido a establecer. En la actualidad, una nueva generación de físicos trabaja en sus propias teorías del todo, armados con una descripción de las fuerzas físicas fundamentales más completa que la que tuvo Einstein a su alcance y sin prejuicios en contra de la mecánica cuántica. Quien logre culminar esta enorme empresa gozará de la misma inmortalidad que acompaña a Einstein y a Newton. Permitirá ahondar en la naturaleza y en aplicaciones técnicas que hoy nos resultan tan incomprensibles como lo eran los agujeros negros y los ordenadores cuánticos hace un siglo.

Lo primero que hay que hacer para trascender a Einstein es entender la totalidad de su legado. En la primavera de 1905, el joven "esclavo de las patentes" —así es como Einstein solía llamarse— escribía a su

amigo Conrad Habicht para avisarle del envío de una serie de artículos, según él “balbuceos sin importancia”. Sólo uno de estos trabajos le parecía “revolucionario”; no trataba de la relatividad, pero le mereció el Premio Nobel en 1921. Terminado en marzo, llevaba por título “Sobre un punto de vista heurístico acerca de la creación y la transformación de la luz”. Einstein se apropió ahí del concepto de cuanto de energía de Max Planck y lo amplió diciendo que los cuerpos calientes sólo pueden emitir o absorber energía en determinadas cantidades discretas.

En dicho ensayo, una de las cinco magistrales aportaciones de 1905, Einstein utilizaba la idea de cuanto para explicar el efecto fotoeléctrico, a saber, que cuando la luz incide sobre un metal, éste emite electrones. Einstein sugería que el haz luminoso se compone de partículas, más tarde denominadas fotones. Con ello contradecía la noción, entonces admitida, de que la luz constituía un fenómeno ondulatorio. El artículo se publicó en junio en *Annalen der Physik*. Sin duda, allanó el camino para la aceptación de la naturaleza dual de la luz, onda y partícula a la vez, fundamental para el desarrollo de la mecánica cuántica. El efecto fotoeléctrico se convertiría en la base de un gran número y variedad de aplicaciones técnicas.

En aquel momento, Einstein aún no se había doctorado. La Universidad de Zúrich había rechazado la tesis que presentó en 1901 —por otra parte, nada excepcional— sobre la teoría cinética de los gases. Casi había desestimado la idea de doctorarse —los trámites le parecían poco más que una “farsa”—, cuando, en 1905, decidió volver a intentarlo. Según su hermana Maja, primero presentó su trabajo sobre la relatividad especial; pero la universidad la consideró “un tanto esotérica”. Luego, probó suerte con “Una nueva determinación de las dimensiones moleculares”, que terminó el 30 de abril y fue aceptado en julio del mismo año. Se dice que la inspiración para este estudio le llegó cuando conversaba con su mejor amigo, Michele Besso, mientras tomaban el té, acerca de las relaciones entre la viscosidad del líquido y el tamaño de las moléculas de azúcar disueltas. Einstein dedujo una expresión matemática que medía la velocidad de difusión para un conjunto de partículas. Podía entonces deducirse el tamaño de las moléculas de azúcar a partir del coeficiente de difusión y la viscosidad de la solución.

A los pocos días de concluir este trabajo, Einstein terminó otro artículo que guardaba relación con el primero y que pretendía asimismo respaldar “la existencia de átomos de tamaño definido”. (El concepto de átomo era todavía objeto de discusión en ciertos círculos.) Bajo el título “Sobre el movimiento que viene impuesto por la teoría cinética del calor a las partículas en suspensión en líquidos en reposo”, apareció en julio en *Annalen*; contenía una predicción del número y la masa de las moléculas contenidas en un determinado volumen de líquido, así como de su movilidad errática. Tales trayectorias caóticas se habían denominado movimiento browniano, en homenaje a Robert Brown, quien a principios del siglo XIX había observado los zigzags de los granos de polen en agua. Einstein sugirió que el movimiento de las moléculas de agua era tan enérgico que éstas empujaban a las partículas en suspensión, provocando una danza visible al microscopio. De este mismo artículo, que contribuyó sobremanera a la mecánica estadística moderna, se dedujeron métodos aplicables a la simulación del comportamiento de los contaminantes que transporta el aire o de las fluctuaciones bursátiles.



## Cronología de una vida extraordinaria



Fragmento del artículo “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”

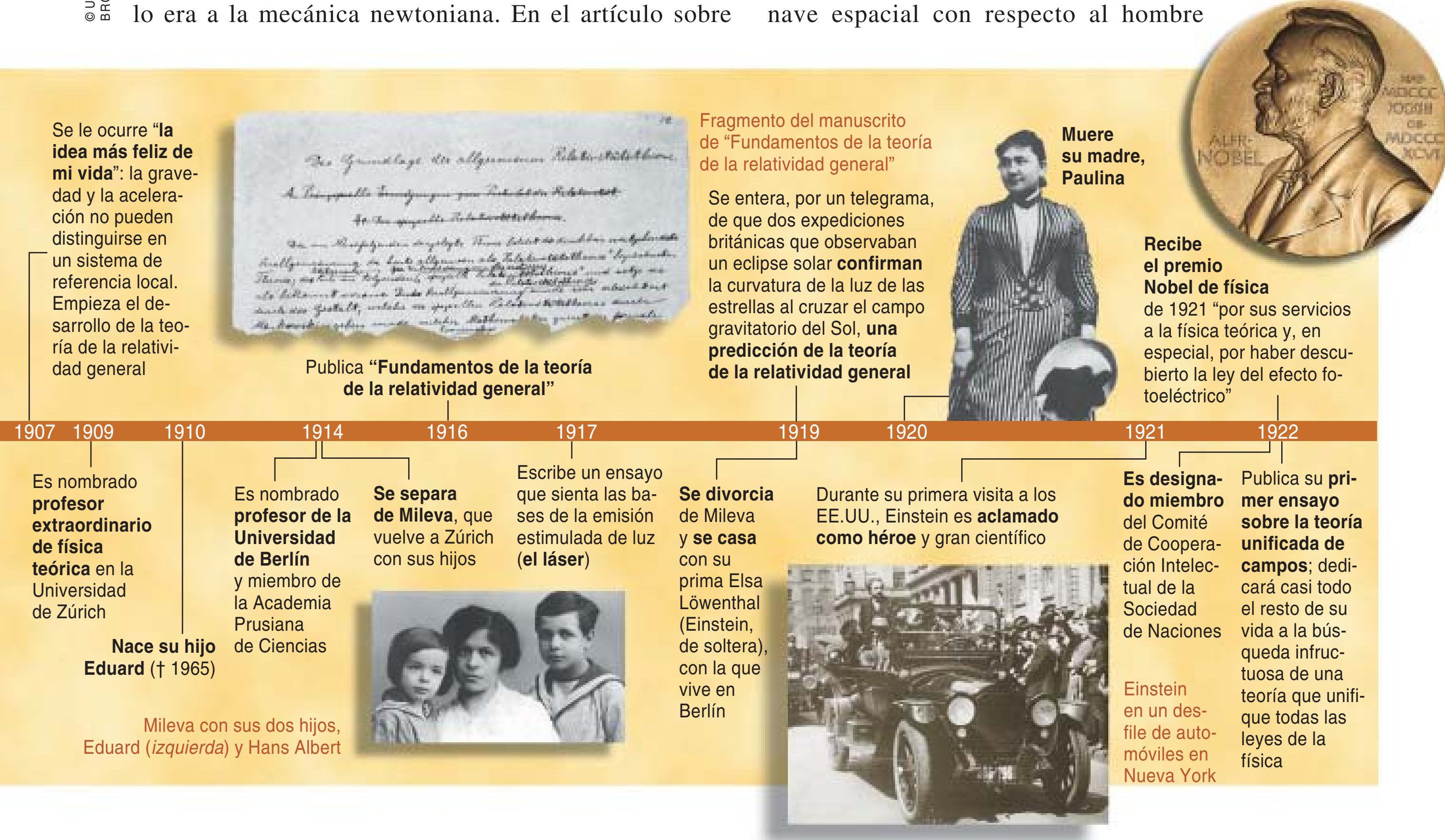
El siguiente artículo, completado a finales de junio, se titulaba “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”. Cabe recordar que Einstein no fue el primero en hablar de la relatividad. En 1632, Galileo sugirió que las leyes físicas permanecen invariables cualquiera que sea el estado de movimiento del observador, siempre que éste se mueva a velocidad constante; por ejemplo, en la cubierta de un navío que avanza con movimiento uniforme, se verá caer una piedra desde el mástil igual que si el barco estuviera en reposo. Este principio de relatividad se mantuvo para las leyes de la mecánica que estableciera Newton a mediados del siglo XVII. Pero la aparición del electromagnetismo, en las postrimerías del XIX, trastornó este orden de cosas. Puesto que las ecuaciones de James Clerk Maxwell indicaban que la radiación electromagnética se propaga por el espacio en forma de onda, los físicos asumieron que ésta fluía a través de un medio, el éter, como las ondas acústicas lo hacen a través del aire. Maxwell demostró que la luz y demás ondas electromagnéticas avanzan a 300 millones de metros por segundo en un vacío que tome como referencia un sistema en reposo en el éter. En un mundo de éter, sin embargo, la relatividad de Galileo no valdría para las ondas luminosas: en cuanto abandonáramos el estado de reposo, la velocidad de la luz dejaría de corresponder a la fijada por Maxwell. No obstante, los experimentos nunca confirmaron tales diferencias entre los sistemas en reposo y los que se mueven: la velocidad de la luz permanecía constante.

Einstein se propuso conciliar el electromagnetismo con el resto de la física. Su profundo sentido de la estética no podía tolerar que el principio de la relatividad no fuese aplicable al electromagnetismo como lo era a la mecánica newtoniana. En el artículo sobre la teoría de la relatividad especial, publicado en septiembre de 1905, extendió el principio de Galileo al electromagnetismo y estableció que la velocidad de la luz es constante. Así resolvía la paradoja de la relatividad, a la vez que planteaba un nuevo desafío para nuestra intuición: no importa si nos hallamos en el balcón, sentados en una mecedora, o si salimos disparados en un cohete espacial imaginario que vuela a velocidades próximas a la de la luz… la velocidad de la luz es siempre la misma.

Este carácter constante echaba por tierra nuestra concepción del tiempo y del espacio: valores absolutos e invariables. Si pensamos en la velocidad como el cociente entre la distancia y el tiempo, para que permanezca constante, la distancia (longitud) y tiempo deberán modificarse siempre a la par. Por tanto, el observador que, desde la mecedora (un sistema de referencia), contemple a alguien que viaja en la nave espacial (otro sistema de referencia), percibirá que el tiempo pasa más lento para el astronauta y que la nave se contrae en la dirección del movimiento.

Si el hombre de la mecedora pudiera medir la masa del astronauta mientras su vehículo surca el espacio, notaría asimismo que ésta ha aumentado con respecto a la anterior al despegue. El quinto y último trabajo de Einstein en este milagroso año, publicado en *Annalen* en noviembre, complementó su trabajo sobre la relatividad especial. Afirmaba allí que “la masa de un cuerpo constituye una medida de la energía que contiene”; concepto que formuló nuevamente en 1907 mediante la ecuación más famosa de todos los tiempos: $E = mc^2$. Esta expresión también sirve para la energía cinética, la energía asociada al movimiento; por tanto, cuanto más deprisa se mueva la nave espacial con respecto al hombre






**1907** — Se le ocurre “**la idea más feliz de mi vida**”: la gravedad y la aceleración no pueden distinguirse en un sistema de referencia local. Empieza el desarrollo de la teoría de la relatividad general

**1909** — Es nombrado **profesor extraordinario de física teórica** en la Universidad de Zúrich

**1910** — **Nace su hijo Eduard** († 1965)

**1914** — Es nombrado **profesor de la Universidad de Berlín** y miembro de la Academia Prusiana de Ciencias

**Se separa de Mileva**, que vuelve a Zúrich con sus hijos

Mileva con sus dos hijos, Eduard (*izquierda*) y Hans Albert

**1916** — Publica “**Fundamentos de la teoría de la relatividad general**”

Fragmento del manuscrito de “Fundamentos de la teoría de la relatividad general”

**1917** — Escribe un ensayo que sienta las bases de la emisión estimulada de luz (**el láser**)

**1919** — Se entera, por un telegrama, de que dos expediciones británicas que observaban un eclipse solar **confirman** la curvatura de la luz de las estrellas al cruzar el campo gravitatorio del Sol, **una predicción de la teoría de la relatividad general**

**Se divorcia** de Mileva y **se casa** con su prima Elsa Löwenthal (Einstein, de soltera), con la que vive en Berlín

**1920** — **Muere su madre, Paulina**

**1921** — **Recibe el premio Nobel de física** de 1921 “por sus servicios a la física teórica y, en especial, por haber descubierto la ley del efecto fotoeléctrico”

Durante su primera visita a los EE.UU., Einstein es **aclamado como héroe** y gran científico

Einstein en un desfile de automóviles en Nueva York

**1922** — **Es designado miembro** del Comité de Cooperación Intelectual de la Sociedad de Naciones

Publica su **primer ensayo sobre la teoría unificada de campos**; dedicará casi todo el resto de su vida a la búsqueda infructuosa de una teoría que unifique todas las leyes de la física

sentado en la mecedora, mayor será su energía cinética y, en consecuencia, su masa, siendo cada vez más difícil acelerarla. A medida que el vehículo se aproxime a la velocidad de la luz, cualquier aceleración adicional exigirá incrementos de energía descomunales y del todo inasequibles. (Por ello los cohetes más rápidos que la luz existen sólo en el dominio de la ciencia ficción.)

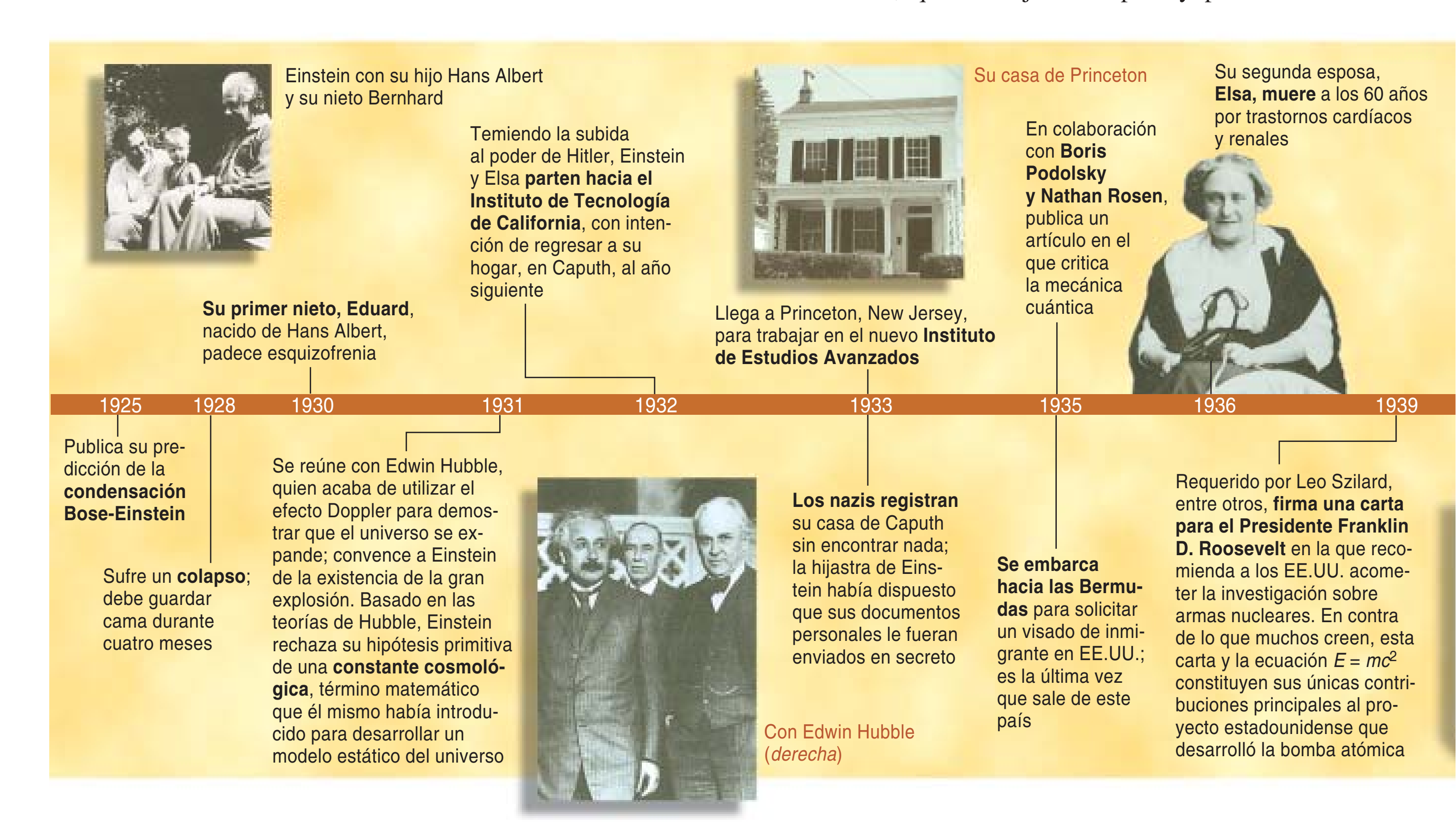
Después de 1905, lo mejor estaba aún por llegar: la teoría de la relatividad general, publicada en 1916, eclipsó todas las hazañas intelectuales que el mismo Einstein (o cualquier otro científico, excepto tal vez Newton) realizara antes o después de entonces. El matemático Henri Poincaré estuvo a punto de adelantarse a Einstein en la formulación de la relatividad especial; pero se quedó a un paso (el más decisivo): se negó a rechazar el concepto de éter. La teoría especial resolvía las disparidades entre la mecánica newtoniana y el electromagnetismo de Maxwell, pero sólo para cuerpos en movimiento rectilíneo uniforme (los que viajan a velocidad constante y en línea recta). Se necesitaba una teoría de la relatividad general que diera cabida al mundo real, el de los cuerpos que cambian la velocidad y la dirección de su movimiento; en otras palabras, debían considerarse los efectos de la aceleración, incluso la más universal de ellas, la gravedad. Para Newton, la gravedad correspondía a una fuerza que actúa de forma instantánea a largas distancias. Según Einstein, en cambio, constituía una propiedad intrínseca del espacio y del tiempo; sostenía que cualquier astro o cuerpo dotado de masa curva el espacio y el tiempo a su alrededor, de forma que los planetas se desplazan sobre trayectorias curvas en el continuo espaciotemporal.

En opinión de Michael Shara, director del departamento de astrofísica del Museo Americano de Historia Natural, la idea de que la masa comba el espaciotiempo y que el espaciotiempo combado impone cómo debe moverse la masa constituye una absoluta genialidad. Los efectos de la relatividad general probablemente se habrían descubierto a partir de mediciones en satélites y púlsares, pero no hasta las postrimerías del siglo XX. Y aun así, quizá no se hubiera igualado la elegante descripción geométrica de la gravedad que diera Einstein.

En 1919, al poco tiempo de su trabajo sobre la relatividad general, se observó durante un eclipse solar que los rayos de luz procedentes de estrellas se desviaban al atravesar el campo gravitatorio del Sol, uno de los fenómenos que predecía dicha teoría. La verificación de la relatividad general catapultó a Einstein a la fama. Con todo, muchos de los que se agolpaban para verle no alcanzaban a entender su logro. Incluso se atribuyó —sin fundamento alguno—al propio Einstein la afirmación de que sólo una docena de personas en todo el mundo comprendían la relatividad, sin duda una exageración. Inmediatamente se formó un grupo de seguidores y admiradores de Einstein. *Scientific American* llegó a patrocinar un certamen, al que concurrieron cientos de personas, que premiaba con 5000 dólares a quien ofreciera la explicación más comprensible de la relatividad. Einstein bromeaba diciendo que él era único de su círculo de amigos que no había participado, aduciendo que no se veía capaz.

No lograba comprender por qué la relatividad causaba tanta fascinación. Describía la realidad física, pero nada tenía que ver con las concepciones subjetivas del espacio y el tiempo que proponían los relativistas culturales. "Nunca entendí", afirmaba, "por qué la teoría de la relatividad, que maneja conceptos y problemas

THE NEW YORK TIMES (con Hubble)



tan apartados de la vida cotidiana, había de encontrar una resonancia tan viva y apasionada en amplios sectores de la población”.

Entre 1916 y 1925, Einstein realizó nuevas contribuciones a la teoría cuántica, incluido el trabajo sobre la emisión estimulada de radiación que, andando el tiempo, daría lugar al láser. Pero quedó decepcionado cuando la nueva mecánica, que describía los fenómenos del mundo subatómico, empezó a interpretarse sobre la base de probabilidades estadísticas en vez de relaciones causa-efecto. Durante los últimos años de su vida, hasta su muerte en 1955, Einstein se concentró en una teoría unificada de campos, que no sólo pretendía describir los campos gravitatorio y electromagnético como dos aspectos de una misma realidad sino también explicar la existencia de partículas elementales y constantes, como la carga del electrón y la velocidad de la luz.

Pero todo acabó en un callejón sin salida. Influyeron en tal desenlace el que Einstein rechazara el nuevo giro que había emprendido la física cuántica, pero también la escasa comprensión que entonces se tenía de las dos interacciones nucleares fundamentales (la fuerte y la débil). “Incluso los más fervientes admiradores de Einstein estarán de acuerdo en que el progreso de la física no habría sufrido demasiado si el científico más grande de todos hubiera pasado los últimos treinta años de su vida navegando a vela”, señala Albrecht Fölsing en una biografía de 1993, aludiendo a una de las aficiones de Einstein. Pero no todas las opiniones son tan radicales. Según Ze’ev Rosenkranz, antiguo responsable del archivo de Einstein, el sabio físico sencillamente se habría adelantado a su época.

La incesante búsqueda de una teoría unificada constituye su mayor legado científico. De hecho, todavía centra el interés de un destacado sector de la comunidad de físicos teóricos, que siguen manejando matemáticas refinadas para explicar todas las fuerzas de la naturaleza. Incluso han recogido los trabajos de Theodor Kaluza y Oskar Klein, ampliando su hipótesis del universo pentadimensional, propuesta que en su día ya llamó la atención de Einstein, en su afán por encontrar una teoría unificada. Asimismo, la continua búsqueda de violaciones de la relatividad quizás ofrezca pistas experimentales que sugieran cómo integrar la gravitación y la mecánica cuántica en una teoría única y sin fisuras. Por otro lado, la recuperada constante cosmológica de Einstein, responsable de una fuerza repulsiva, permanece en la vanguardia de una cosmología que intenta hallar las claves de la “energía oscura”.

En los últimos años de su vida, Einstein se concentró en una empresa científica que resultó prematura; sin embargo, cosechó mayores éxitos empleando su renombre para defender sus ideales. Pronunció conferencias a favor del pacifismo y sobre política internacional; defendió la necesidad de contrarrestar los esfuerzos nazis para desarrollar una bomba nuclear. Durante el resto de sus días sostuvo el mismo anhelo que le llevara desde la teoría de la relatividad —el enlace de la mecánica newtoniana con el electromagnetismo de Maxwell— a una teoría globalizadora del campo unitario. Según Gerald Holton, experto en la vida y la obra de Einstein, éste, igual que en su labor científica, mostraba una necesidad compulsiva de unificar también en sus ideas políticas, sociales y hasta en su comportamiento cotidiano.

Si Einstein regresara de repente entre nosotros por alguna mágica curvatura postrera del espacio y el tiempo, probablemente no prestaría mucha atención a las celebraciones mundiales de su año milagroso. Más interesado en los avances científicos que en el circuito mediático, tal vez se apartaría de las ceremonias conmemorativas del Año de la Física en Jerusalén, Zúrich, Berlín o Princeton para ponerse al corriente de los últimos intentos en detectar las ondas gravitatorias postuladas por la relatividad general; luego quizá discutiría con los científicos sobre los resultados de la Sonda B de Gravedad de la NASA, que puede aportar pruebas del arrastre del sistema de referencia —predicción relativista de que un cuerpo masivo en rotación, cual la Tierra, arrastra consigo el tiempo y el espacio.

A buen seguro, le sorprendería ver que su constante cosmológica, por largo tiempo desechada, ha resucitado para explicar por qué se acelera la expansión del universo. Desde la distancia, quedaría fascinado por los trabajos sobre supercuerdas, branas, teoría M y gravedad cuántica de bucles, tentativas todas de encajar la mecánica cuántica con la gravitación dentro su teoría de la relatividad general. Sin duda le regocijaría ver que la física está tratando de superar sus hitos, impulsada por su mismo anhelo: hallar un marco teórico universal y coherente que lo explique todo, desde los fenómenos subatómicos hasta los cósmicos.




CRONOLOGIA COMPILADA POR BETSY QUERNA

# Nuestro Einstein cotidiano

## Orientarse con un GPS, colgar un cuadro con un nivel láser, fotocopiar: todo se lo debemos a Einstein

Philip Yam

En su mayoría, los manhattanitas sólo se dirigen al neoyorquino barrio de Queens de camino del aeropuerto o les apetece asistir a un partido de béisbol de los Mets. Cierta tarde de domingo, en el que no debía tomar ningún avión y los Mets jugaban fuera de su estadio, me aventuré hasta la parte nordeste de Queens, en concreto, hasta los aledaños de College Point. Allí, en un centro comercial que se extiende a lo largo de la congestionada vigésima avenida, me fui en busca de Albert Einstein.

El legado de Einstein fundamenta hoy numerosos campos de la investigación científica. Capacita a los físicos para acelerar partículas hasta velocidades próximas a la de la luz y a los astrónomos para medir y crear modelos sobre el comportamiento de los fenómenos celestes. Pero las aportaciones que Einstein realizó a lo largo de su vida se extienden y enraízan profundamente también en los productos de la técnica que a diario encontramos en nuestro camino. Sus teorías sobre la interacción entre la luz y la materia, sobre cómo los átomos emiten radiación y cómo la velocidad y la gravitación afectan a los relojes, revisten suma importancia para el funcionamiento de numerosos ingenios que hoy forman parte de nuestra vida cotidiana.

En el centro comercial de College Point, mi primer encuentro con Einstein tuvo lugar apenas entré en los grandes almacenes Target. Las puertas se abrieron en cuanto una célula fotoeléctrica —un "ojo electrónico"— detectó que me acercaba. El sensor, una lámina de material semiconductor emparedado entre dos electrodos, es sensible a la luz. Cuando se produce alguna variación en la intensidad luminosa —sea por la interrupción de un haz de luz o por la disminución de la iluminación general— la cantidad de corriente eléctrica generada por el dispositivo también cambia. Mediante unos circuitos se activa, por fin, la apertura de las puertas.


### Resumen

- Gran parte de los útiles técnicos que empleamos o disfrutamos se basa en teorías de Einstein.
- El efecto fotoeléctrico opera en las células solares y los fotodetectores electrónicos; la emisión estimulada de radiación constituye el fundamento de los láseres.
- La teoría de relatividad proporciona las correcciones necesarias para el GPS.



ANTHONY MARINO

EINSTEIN EN VENTA. El legado del eminente físico se extiende desde los dispositivos que operan mediante energía solar, los equipos de GPS y las cámaras digitales hasta los láseres de los reproductores de DVD, los niveles de láser y no pocos juguetes.

Dichos sensores constituyen una aplicación directa del efecto fotoeléctrico, a saber, que cuando la luz incide sobre un metal, éste emite electrones. Einstein no fue el descubridor de este fenómeno, observado por vez primera en 1839 en Francia. Pero sí quien logró explicarlo, mientras desentrañaba los cálculos de Max Planck. En 1900, basándose en observaciones, Planck llegó a la conclusión de que un cuerpo caliente emite luz de una determinada frecuencia (o color) en porciones indivisibles a las que denominó "cuantos". Planck introdujo entonces su constante *h*, hoy célebre, para que las ecuaciones que describían la "radiación de cuerpo negro" produjeran los valores correctos.

En opinión de Einstein, sin embargo, *h* representaba mucho más que un mero parche matemático. Postuló que la luz, en lugar de fluir en forma de onda continua de energía, viaja en paquetes. Merced a su análisis de 1905, al que siguieron otros trabajos, Einstein hizo ver que la luz puede comportarse como un haz de partículas; cuando así lo hace, los impactos de éstas sobre el metal arrancan electrones, de la misma forma que la bola blanca rompe y dispersa el triángulo de bolas al comenzar una partida de billar americano.

Einstein encontró también explicación para una particularidad, entonces desconcertante, del efecto fotoeléctrico. Al aumentar la intensidad de la luz incidente, aumentaba también el número de electrones expulsados del metal, pero no la velocidad de éstos, que permanecía constante. La única forma de alterar dicha velocidad era cambiar el color de la luz que iluminaba el metal. Para dar cuenta de este fenómeno, Einstein consideró que la energía de cada partícula de luz, o fotones, correspondía al producto de

su frecuencia por la constante $h$. En experimentos posteriores se confirmaron las hipótesis de Einstein, a quien, por su explicación del efecto fotoeléctrico, le fue concedido el premio Nobel de Física de 1921.

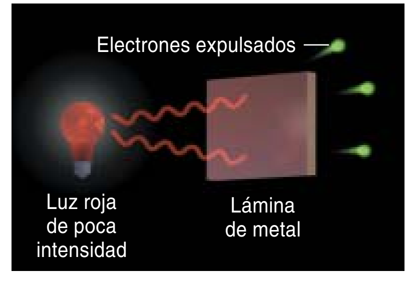
El efecto fotoeléctrico opera hoy en instrumentos que encienden el alumbrado público cuando anochece, regulan la intensidad del tóner en las fotocopiadoras o determinan el tiempo de exposición de las cámaras fotográficas. De hecho, interviene en prácticamente todos los dispositivos electrónicos que controlan o responden a la iluminación; incluso en los alcoholímetros, donde una fotocélula detecta el cambio de color que se produce tras la reacción de un gas indicador con el alcohol del aliento. El efecto fotoeléctrico condujo también a la invención de los fotomultiplicadores. Un fotomultiplicador consta de un tubo de vidrio en el que se ha hecho el vacío y se han colocado una serie de piezas metálicas o dínodos. Estos emiten un número creciente de electrones (el segundo dínodo más electrones que el primero, el tercero más que el segundo) a partir del momento en que una diana de otro metal, el fotocátodo, recibe el impacto de fotones. Los fotomultiplicadores se encargan de canalizar la luz en los detectores astronómicos y en las cámaras de televisión.

La aplicación más visible del efecto fotoeléctrico se encuentra en las células solares o fotovoltaicas. Operativas desde los años cincuenta del siglo pasado, convierten en energía eléctrica entre un 15 y un 30 por ciento de la energía luminosa incidente. Se utilizan para alimentar calculadoras, relojes, viviendas ecológicas, satélites en órbita y los vehículos que exploran la superficie de Marte.

EL EFECTO FOTOELECTRICO

## Ondas y partículas

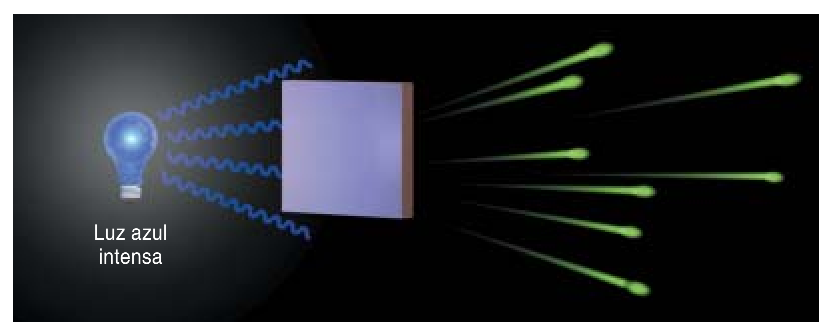
Sensores, células fotovoltaicas y otros fotodetectores electrónicos operan merced al efecto fotoeléctrico. Describe éste la capacidad de la luz para arrancar electrones de una superficie metálica. Dichos electrones escapan del metal a una velocidad que no depende de la intensidad de la luz incidente, sino de su color. La física clásica, que describe la luz como una onda, no explica este fenómeno. Pero la cuestión quedó resuelta cuando Einstein dedujo que la luz también podía actuar como un paquete de energía, vale decir, como una partícula.



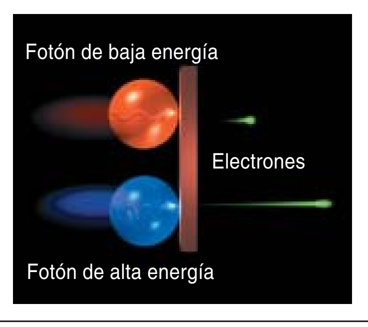

**1** La luz provoca la expulsión de electrones de una lámina de metal. Según la teoría clásica, la luz corresponde a una onda continua, cuya energía se distribuye sobre la onda.




**2** El aumento de la intensidad de la luz provoca la emisión de un número mayor de electrones. La teoría clásica predice que el incremento de las ondas luminosas debería traducirse en un aumento de la velocidad de los electrones expulsados; pero no es así.




**3** Si la luz roja se cambia por otra azul, se arrancan electrones mucho más veloces. Ello se debe a que la luz puede comportarse no sólo como una onda continua sino también como un haz de paquetes discretos de energía, o fotones. Un fotón azul posee más energía que un fotón rojo; en esencia, se comporta como una bola de billar con mayor momento cinético, por lo que choca con más ímpetu contra un electrón (*derecha*). La concepción "corpuscular" de la luz explica también por qué una mayor intensidad luminosa aumenta el número de electrones expulsados: al ser mayor el número de fotones que inciden sobre el metal, mayor será también el número de electrones alcanzados.




ALFRED T. KAMAJIAN

## El láser

Volviendo a los grandes almacenes, observo tapizando las paredes que rodean la sección de electrónica, justo detrás de las 30 cajas registradoras de salida, rimeros de reproductores de DVD y lectores portátiles de CD, muy económicos. Las cajas, así como los reproductores, utilizan algún tipo de célula fotoeléctrica; pero lo que reviste mayor interés, desde una perspectiva einsteiniana, es el haz rojo de luz coherente que emite el lector. Hoy ubicuo, el láser debe su existencia a una construcción teórica erigida por Einstein en 1917.

En su artículo "Sobre la teoría cuántica de la radiación", Einstein continuó explorando las relaciones entre la luz y la materia. Mediante la absorción de radiación electromagnética, los átomos podían excitarse; es decir, acceder a un estado de mayor energía. Después, de forma espontánea, éstos emitían luz para regresar a un estado energético inferior. Además de la absorción y la emisión espontánea, dedujo la existencia de una tercera clase de interacción entre la luz y la materia; en ella, un fotón podría inducir a un átomo excitado a emitir un segundo fotón. A su vez, estos dos fotones podrían estimular a otros dos átomos a emitir dos nuevos fotones, obteniendo así cuatro fotones. Estos cuatro fotones podrían generar otros ocho, y así sucesivamente.

Para crear un haz coherente de fotones debería lograrse primero una “inversión de la población”, vale decir, que el número de átomos excitados superase el de no excitados; luego, conseguir que los fotones emitidos se agrupasen en un haz intenso. Ello no se lograría hasta 1954, fecha en la que Charles H. Townes y sus colaboradores, de la Universidad de Columbia, diseñaron el “máser” (acrónimo de la expresión inglesa que significa “amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación”), precursor del láser.

Observado en perspectiva histórica, “resulta asombroso que la invención del láser tardase tanto”, escribía Townes en sus memorias de 1999, *How the Laser Happened*. “El láser pudo haberse hecho realidad treinta años antes”. Una posible razón: si bien las ecuaciones de Einstein establecen que la emisión estimulada produce nuevos fotones, no indican, de forma explícita, que se trate de reproducciones exactas, fotones idénticos no sólo en frecuencia sino también en fase. El Sol, los filamentos de tungsteno de las bombillas y otras fuentes luminosas producen gran cantidad de fotones de la misma frecuencia, pero desacompasados —la versión lumínica del ruido aleatorio. Si se logra la coherencia de todos los fotones —que den la misma nota en el mismo instante, siguiendo el símil acústico— se obtiene un singular “estruendo” en lugar de un “siseo”.

Según conjetura Townes, hoy en la Universidad de California en Berkeley, Einstein nunca tuvo en cuenta dicha coherencia. Aun cuando algunos físicos reconocieran que los fotones serían coherentes, los cálculos de Einstein indicaban que la emisión estimulada ocurriría en raras ocasiones. “Einstein predijo un efecto tan insignificante, que nadie lo tomó en consideración”, añade Carlos R. Stroud, experto en óptica cuántica de la Universidad de Rochester. En palabras de Emil Wolf, del mismo centro: “Einstein iba muchos años por delante de cualquier otro”.

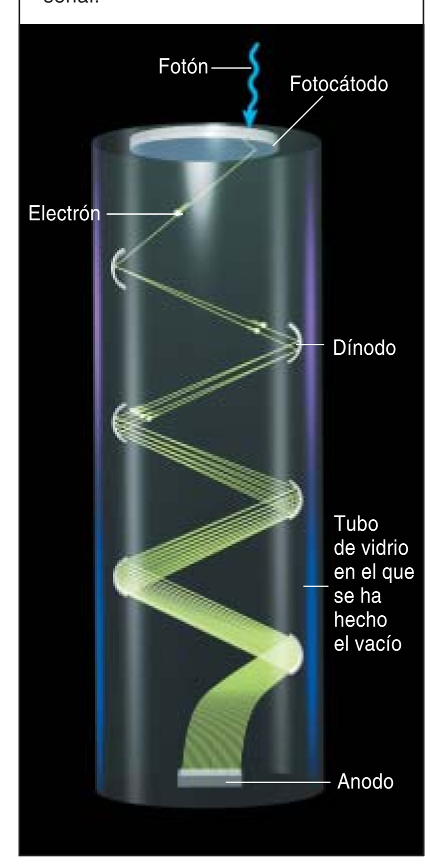
En los decenios que siguieron al artículo de 1917, aparecieron referencias esporádicas a la creación de emisión estimulada, pero en ningún caso tuvieron continuidad. En los primeros años cincuenta, Townes se percató de que el elemento clave para crear radiación amplificada consistía en una cavidad resonante. En los láseres —inventados algunos años después que los máseres—, la cavidad corresponde al espacio comprendido entre dos espejos; al rebotar entre ellos, la luz va rebotando, adquiriendo cada vez mayor intensidad, hasta que un haz emerge a través de uno de los espejos (que es parcialmente transmisor).

Sobre esa base científica, los ingenieros han construido láseres con materiales muy dispares (hasta de gelatina mezclada con un colorante fluorescente o incluso agua tónica). El láser se generalizó con el advenimiento de la industria de los semiconductores y la preparación de diodos fotoemisores. En realidad, la emisión estimulada ocurre en una asombrosa gama de dispositivos: reproductores de DVD, niveles láser, punteros, giróscopos para aviones, herramientas de corte, instrumental médico y en comunicaciones a través de fibra óptica, entre otros. Los láseres se han vuelto indispensables para el progreso de la ciencia. El premio Nobel se ha concedido a varios investigadores que los aplicaron al estudio de las reacciones químicas o la manipulación de objetos microscópicos, por mencionar dos usos. Los máseres se utilizan como relojes de gran precisión en el Observatorio Naval estadounidense y para amplificar señales débiles de radio en la investigación astronómica.

FOTOMULTIPLICADORES

### Trabajo luminoso

El tubo fotomultiplicador, esencial en las cámaras de vídeo, aprovecha el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en impulsos eléctricos. Un fotón impacta en un metal (fotocátodo), que emite entonces un electrón. Campos magnéticos de bobinas circundantes (*no representadas en el dibujo*) conducen este electrón hasta un metal de otro tipo (dínodo) que, al ser alcanzado por el electrón, emite varios electrones más. Una serie de dínodos “en cascada” multiplican así el número de electrones, que al llegar al ánodo generan una señal.




ALFRED T. KAMAJIAN

## El GPS

Pronto llegué a la siguiente parada de mi periplo por Target: la sección de deportes de aire libre. Pero, al no encontrar lo que andaba buscando, tuve que volver al departamento de electrónica. “¿Tienen ustedes aparatos de GPS?”, pregunté en el mostrador. “Lo sentimos, se nos han agotado”, respondió el dependiente.

Sin embargo, en Circuit City, que está al lado, ofrecían varios modelos. Estos instrumentos de bolsillo proporcionan la latitud, longitud y altitud, calculadas a partir de las señales de cronometraje que emite el sistema de satélites de localización global o GPS. Para obtener medidas precisas de dichas distancias, el tiempo debe medirse con gran precisión; por ello, cada uno de los 24 satélites del sistema está dotado de un reloj atómico [*véase* “La reestructuración del GPS”, por Per Enge; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2004].

La mayoría de los receptores GPS que hoy podemos encontrar en una tienda determinan nuestra posición

con una precisión de unos 15 metros. Un error inferior a 30 metros indica, sin duda, que el dispositivo toma en consideración los efectos relativistas. Sin esta corrección, sería imposible sincronizar los relojes instalados allá arriba con los de tierra. La relatividad establece que los objetos que se mueven a gran velocidad envejecen más lentamente que los estacionarios. Cada uno de los satélites GPS avanza, como un rayo, a unos 14.000 kilómetros por hora con respecto a nosotros; consecuencia de ello es que el reloj atómico que lleva a bordo retrasa su ritmo alrededor de 7 microsegundos al día con respecto a los situados en tierra.

La gravedad, por su parte, induce un efecto relativista todavía más acusado, si bien contrario. Situados a una altura media de unos 20.000 kilómetros, los satélites GPS experimentan una gravedad menor que la correspondiente a la superficie terrestre. Por esa razón, los relojes de a bordo adelantan con respecto a los nuestros unos 45 microsegundos al día. Por tanto, el sistema GPS debe tener en cuenta un desfase neto de 38 microsegundos diarios; de lo contrario, cada día se introduciría un error acumulativo de unos 11 kilómetros. (En realidad, dichos efectos entrañan mayor complejidad, puesto que los satélites siguen una órbita excéntrica: pasan más cerca de la Tierra en ciertos momentos y más lejos en otros.)

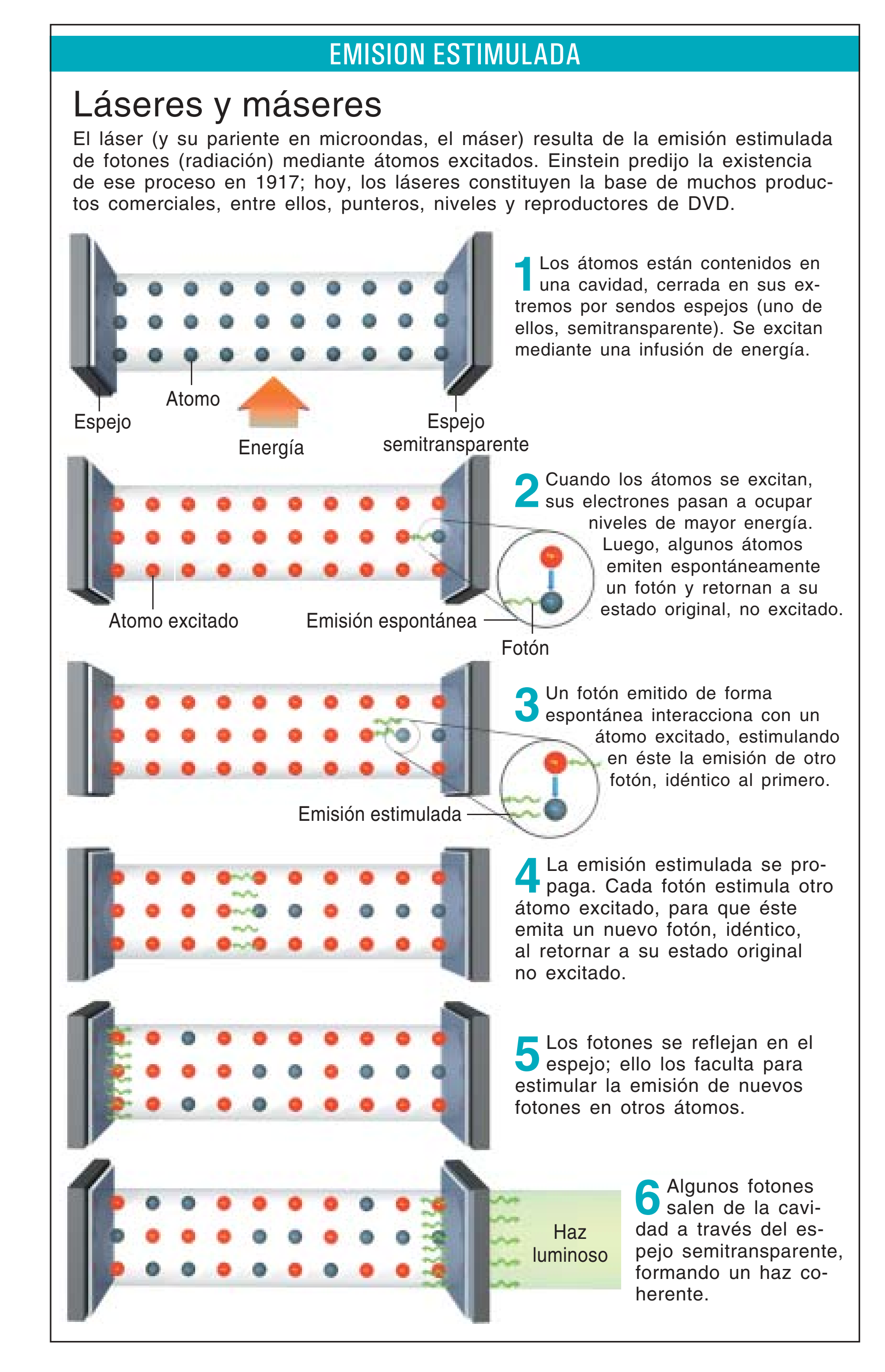
La necesidad de las correcciones relativistas no resultó evidente para los primeros diseñadores del sistema GPS, hace unos 30 años, en su mayoría ingenieros militares. Fue un asunto muy discutido. Algunos las consideraban imprescindibles; otros no. Tal era el desacuerdo, que el primer satélite GPS fue lanzado sin activar el compensador de frecuencia; aunque, por si acaso, iba provisto de un conmutador que permitiera accionarlo. Tardarían poco en darse cuenta de que los efectos relativistas no eran, ni mucho menos, despreciables.

Los métodos de GPS más recientes dependen menos de las correcciones relativistas, al menos, para los datos de posición. En el GPS diferencial, que, además del receptor portátil, se vale de receptores instalados en posiciones terrestres conocidas, los errores de desfase se anulan. (Se trata del sistema de afinación del GPS para grandes áreas, o WAAS). Pero quienes se sirven del GPS para controlar el tiempo, como los radioastrónomos, siguen sin poder prescindir de Einstein.

EMISION ESTIMULADA

## Láseres y máseres

El láser (y su pariente en microondas, el máser) resulta de la emisión estimulada de fotones (radiación) mediante átomos excitados. Einstein predijo la existencia de ese proceso en 1917; hoy, los láseres constituyen la base de muchos productos comerciales, entre ellos, punteros, niveles y reproductores de DVD.




1 Los átomos están contenidos en una cavidad, cerrada en sus extremos por sendos espejos (uno de ellos, semitransparente). Se excitan mediante una infusión de energía.

2 Cuando los átomos se excitan, sus electrones pasan a ocupar niveles de mayor energía. Luego, algunos átomos emiten espontáneamente un fotón y retornan a su estado original, no excitado.

3 Un fotón emitido de forma espontánea interacciona con un átomo excitado, estimulando en éste la emisión de otro fotón, idéntico al primero.

4 La emisión estimulada se propaga. Cada fotón estimula otro átomo excitado, para que éste emita un nuevo fotón, idéntico, al retornar a su estado original no excitado.

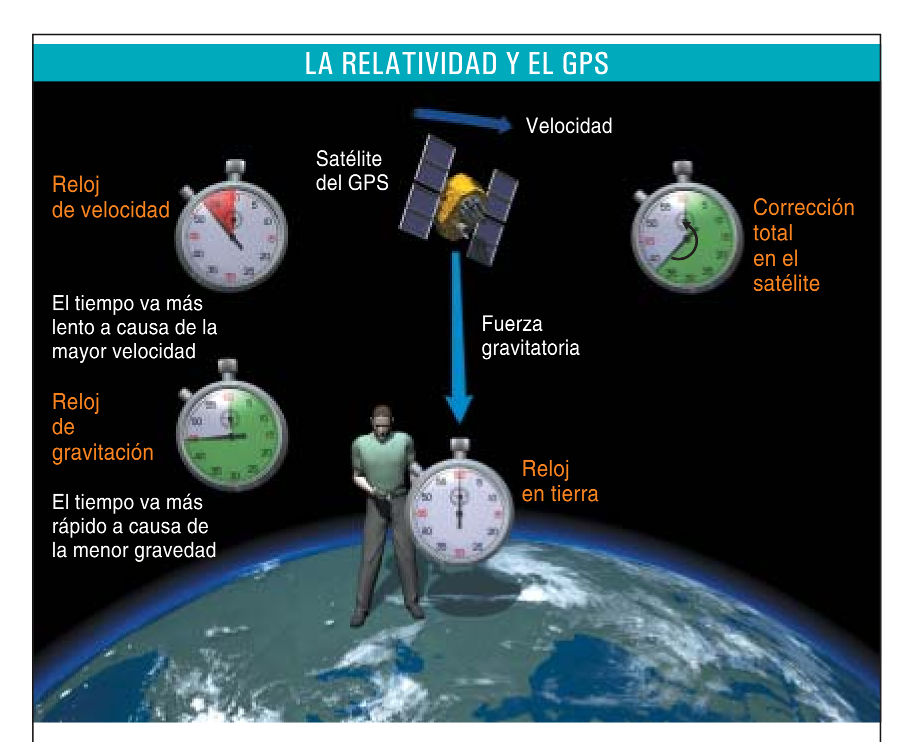
5 Los fotones se reflejan en el espejo; ello los faculta para estimular la emisión de nuevos fotones en otros átomos.

6 Algunos fotones salen de la cavidad a través del espejo semitransparente, formando un haz coherente.

ALFRED T. KAMAJIAN

### Einstein, inventor

Einstein se dedicó también a inventar; pero sus artefactos no se venden en el centro comercial que visité, ni en ningún otro. Sus escarceos en la fabricación de electrodomésticos quizá no se han traducido en bienes de consumo duraderos, pero los mecanismos que patentó se utilizan para otras labores. En colaboración con el físico Leo Szilard, Einstein diseñó refrigeradores domésticos en los años veinte. Se basaban en bombas electromagnéticas sin fugas (los gases refrigerantes




## Tiempo célere, tiempo lento

El sistema de localización global GPS requiere correcciones relativistas. Por una parte, a causa de la velocidad de los satélites GPS, los relojes que éstos llevan a bordo se retrasan unos siete microsegundos diarios con respecto a los terrestres. Por otra, al ser menor la atracción gravitatoria que experimentan los satélites, se suma otro efecto relativista que adelanta los relojes 45 microsegundos al día. Para que el GPS proporcione datos precisos, pues, debe aplicarse un factor de corrección que retrase los relojes en órbita 38 microsegundos cada día. En los receptores GPS dotados del sistema de afinación del GPS para grandes áreas (WAAS), los errores relativistas se cancelan, porque estos equipos se valen de señales adicionales, procedentes de estaciones de referencia instaladas en tierra, en ubicaciones conocidas.

ALFRED T. KAMAJIAN

entonces utilizados eran tóxicos). La aparición de refrigerantes más seguros hizo inútil su invento; la nevera de Einstein nunca llegó al comercio. Dicha bomba, sin embargo, se utiliza hoy para propulsar el sodio que refrigera los reactores nucleares nodriza [*véase* "Los refrigeradores de Einstein-Szilard", por Gene Danne; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1997].

Desde luego, no eran las ansias de inventar lo que impulsaba a Einstein. Movido sobre todo por su deseo de comprender la naturaleza, dejó para otros las aplicaciones técnicas de sus avances teóricos. Pensemos, por ejemplo, en la ecuación $E = mc^2$, que nació en su artículo de 1905 sobre la relatividad. A nadie, hasta entonces, se le había ocurrido que la materia pudiera convertirse en energía. Su sencillez —multiplíquese una pizca de masa por el cuadrado de la velocidad de la luz y se obtendrá una enorme cantidad de energía— invitaba a la comprobación experimental.

Claro está que al fabricar la bomba de fisión, a los científicos del Proyecto Manhattan les motivaban imperativos más acuciantes que verificar si $E$ equivale a $mc^2$. Constituye, sin duda, uno de los legados técnicos de Einstein que podrían cambiar el mundo de forma radical.

### Bibliografía complementaria

HOW THE LASER HAPPENED: ADVENTURES OF A SCIENTIST. Charles H. Townes, Oxford University Press, 1999.

RELATIVITY AND THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM. Neil Ashby en *Physics Today*, vol. 55, n.º 5, páginas 41-47; mayo de 2002.




TRES DE LAS TEORIAS DE EINSTEIN constituyen una fuente inagotable de inspiración para los ingenieros del siglo XXI. Se están desarrollando dispositivos que aprovechan el movimiento browniano, ese curioso comportamiento espasmódico de las partículas microscópicas que Einstein explicó en sus justos términos. La espintrónica, una técnica recién nacida, saca partido de la teoría de relatividad especial. En laboratorios de distintas partes del mundo se están diseñando sensores basados en los condensados de Bose-Einstein, un extraño estado de la materia que el maestro predijo hace 80 años.

# Aplicaciones de la física moderna para el siglo XXI

**Técnicas de nuevo cuño aplican a la informática, la medicina e incluso a la navegación algunas teorías de Einstein**

W. Wayt Gibbs

En 1905, Albert Einstein contaba 26 años. Ponía punto final a su tesis doctoral sobre el tamaño de las moléculas. Se ganaba la vida en la oficina de patentes suiza, evaluando los inventos de otros. Cabría imaginar que su trabajo cotidiano le animaba a pensar en las aplicaciones prácticas de las teorías que desarrollaba en su tiempo libre. Nada más lejos de la realidad. No hay indicio alguno de que las nuevas formas de entender la materia, la energía y el tiempo, que ese mismo año publicó en cinco de los más sobresalientes artículos de su extraordinaria carrera, fueran a inspirar la construcción de máquinas de nuevo cuño para el progreso de la industria y la medicina.

No es que desdeñase la ingeniería. Sencillamente, no era lo suyo. Sus inventos, entre ellos un refrigerador provisto de una bomba sin fugas y carente de partes mecánicas móviles, nunca llegaron a comercializarse. Tampoco se perdió mucho. A lo largo del siglo XX, otros se dedicaron a desarrollar una amplia gama de aplicaciones técnicas basadas en los conceptos einsteinianos que revolucionaron la física: que la luz llega en paquetes individuales, los fotones, que respetan siempre un límite universal de velocidad, $c$, y que la materia y la energía pueden intercambiarse a razón de $E = mc^2$.

Los ingenieros del siglo XXI han dado con nuevas formas de sacar partido de tales principios. La relatividad podría revolucionar la lógica y la construcción de los ordenadores, dando lugar a máquinas de cómputo innovadoras. El movimiento aleatorio de las moléculas, o browniano —fenómeno que Einstein explicó también en 1905—, se está aplicando a la construcción de nanodispositivos que acelerarán, por ejemplo, el análisis del ADN. Los condensados de Bose-Einstein, estados exóticos de la materia que Einstein imaginó en uno de sus clásicos "experimentos ideales", se están preparando en laboratorios de todo el mundo; estos enjambres coherentes de átomos ultrafríos —la versión material de los rayos láser— podrían utilizarse en relojes atómicos portátiles, en giróscopos de gran precisión para la navegación y en sensores de gravedad, que permiten cartografiar vetas minerales y yacimientos petrolíferos.

Nos ceñiremos a tres de las aplicaciones más novedosas, aún en desarrollo, de las teorías de Einstein. Sin duda, en los años y decenios venideros llegarán más aplicaciones como éstas. A pesar de que ha transcurrido casi un siglo desde que el maestro de la física comenzara a forjar nuevas herramientas matemáticas con las que describir el universo, siguen siendo una fuente inagotable de inspiración para inventores e ingenieros.

## Computadoras relativistas

El único procesador que Einstein utilizó en 1905 para elaborar su teoría de la relatividad especial fue el encerrado en su cráneo. Aquella máquina bioquímica era, en muchos sentidos, mucho más hábil que cualquier computadora electrónica. Ninguno de los microchips basados en semiconductores construidos hasta la fecha puede competir, en cuanto a densidad y eficiencia energética, con el cerebro humano: este centro nervioso encapsula alrededor de mil billones de elementos procesadores en una masa encefálica, de un kilo de peso, que consume menos energía y genera menos calor que un microprocesador Pentium 4.

De hecho, la disipación de calor y el consumo energético constituyen hoy los mayores obstáculos para la industria de semiconductores, que busca cómo aumentar

DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

la potencia de los microcircuitos sin elevar los costes. En un plazo de 20 años, el avance de los procesadores digitales de silicio tropezará con limitaciones físicas y económicas fundamentales. A los fabricantes sólo les quedará una opción: basar sus diseños en principios físicos diferentes; los de la relatividad especial, por ejemplo.

A primera vista, parece una combinación inverosímil, pues la relatividad especial concierne al mundo de los cuerpos muy veloces. En esa teoría, Einstein elimina los conceptos de tiempo y reposo absolutos: lo único constante, afirma, es $c$, la velocidad de la luz en el vacío. Las consecuencias para todo objeto que se mueva a gran velocidad (con respecto al observador) resultan extrañas: su longitud se acorta y el tiempo parece transcurrir más lento que para el observador. Si el objeto se mueve en el seno de un campo eléctrico estacionario, lo percibe como si fuera, en parte, magnético. No obstante, estos efectos relativistas son insignificantes, a menos que el objeto alcance velocidades próximas a $c$, cuyo valor se acerca a los 300 millones de metros por segundo.

Por supuesto que los ordenadores, ni siquiera los "portátiles", no se mueven a semejantes velocidades; pero sí los electrones de sus circuitos. David D. Awschalom y su grupo, de la Universidad de California en Santa Bárbara, acaban de mostrar que la relatividad puede aprovecharse para que los raudos electrones que circulan por los semiconductores ejecuten nuevas e impresionantes proezas.

El proyecto se encuentra todavía en su fase inicial, como la construcción de las primeras puertas lógicas de semiconductores hace unos 40 años. Pero si los ingenieros logran integrar millones de puertas relativistas en un pequeño chip de silicio —Awschalom está trabajando justamente en eso, en colaboración con Intel y Hewlett-Packard—, podrían fabricarse procesadores harto más veloces que los actuales, que consumieran menos energía y disiparan menos calor.

Y lo que todavía reviste mayor importancia: los chips relativistas aplicarían una lógica más refinada que la de los ordenadores actuales (binaria). En principio, estas nuevas máquinas podrían incluso modificar su sistema de conexiones internas, adaptándose de forma casi instantánea a la tarea que debieran realizar en cada momento. Imaginemos, por ejemplo, un teléfono móvil capaz de reconfigurar su transceptor para utilizar cualquier red del mundo y que, con sólo pulsar una tecla, reprogramara su procesador para que éste tradujera la conversación de un idioma a otro.

Estos chips podrían construirse, lo más seguro, en las mismas fábricas que producen los microprocesadores actuales. No se trata de sintetizar nuevos materiales; el ingrediente secreto yace en la física moderna: los fenómenos de cuya descripción se ocupan la relatividad y la mecánica cuántica.

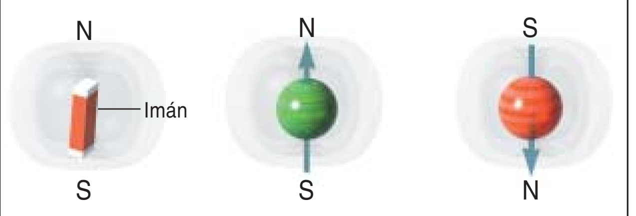
## Resumen

- Si bien abstractas, las ideas de Einstein siguen inspirando nuevas aplicaciones técnicas. La relatividad especial, por ejemplo, constituye la base de microcircuitos rápidos y eficientes que operan merced a la manipulación del espín electrónico.
- Su comprensión del movimiento molecular ha llevado hasta los trinquetes brownianos, dispositivos que permiten clasificar segmentos de ADN o separar partículas sólidas suspendidas en agua.
- Einstein predijo que los átomos ultrafríos se "condensan" en un estado equivalente al de los fotones en un láser; ahora sabemos que es cierto. Este fenómeno podría dar lugar a detectores de gravedad supersensibles y giróscopos superestables.

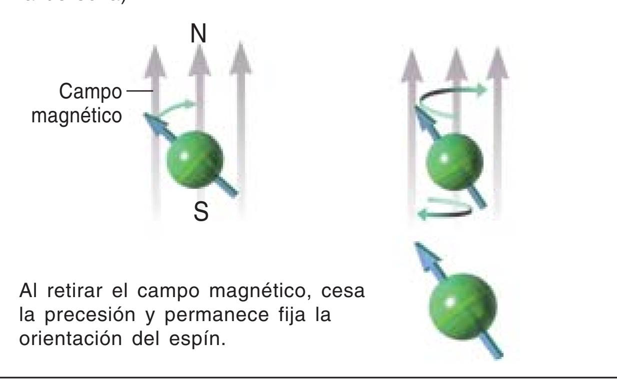
ESPIN ELECTRONICO

### Magia magnética

El electrón (*representado mediante una esfera*) cuenta con una propiedad cuántica, el espín, que le hace comportarse como si se tratara de un imán que gira en torno al eje que une sus polos norte y sur. Tal rotación puede tomar varias direcciones.




Un campo magnético provoca que el electrón pivote como una brújula para alinear su espín con el campo (*abajo, a la izquierda*). Al propio tiempo, el eje de espín experimenta también una precesión, cual peonza en bamboleo (*abajo, a la derecha*).




Al retirar el campo magnético, cesa la precesión y permanece fija la orientación del espín.

ALFRED T. KAMAJIAN

## Espintrónica

Los microchips semiconductores al uso operan según la teoría "clásica" del electromagnetismo, que data del siglo XIX. Las obleas de silicio se "bombardean" con iones, que forman diminutos islotes, con exceso o escasez de electrones. Mediante electrodos microscópicos ubicados en torno a los islotes se aplican tensiones eléctricas, que expulsan o introducen electrones en estas regiones para abrir o cerrar las puertas lógicas y regular así la corriente eléctrica que circula por ellas.

Si un gran número de electrones se empujan de acá para allá mediante la acción de campos eléctricos, algunos salen disparados en direcciones aleatorias, desperdiciando energía, y otros colisionan entre sí, liberando calor; constituye, pues, una forma tosca de conducirlos. Hace ya más de un decenio que los físi-

cos están experimentando con un método más sutil: manipular los electrones mediante fuerzas magnéticas.

Un electrón opera como si llevara consigo una diminuta barrita imantada. Los imanes constan de dos polos: norte y sur. Igual que la Tierra, que gira sobre sí misma en torno al eje que une sus polos, cada electrón cuenta también con una orientación magnética cuantizada o espín. Si bien no llegan a girar de verdad, estas partículas se comportan como diminutos giróscopos: si se les aplica un campo magnético, sus polos efectúan un movimiento de precesión (su eje barre una superficie cónica); al retirar el campo magnético, la orientación de su espín se mantiene fija. Este efecto puede utilizarse para provocar que la precesión del espín pase de apuntar hacia arriba a hacerlo hacia abajo, lo que equivaldrá a cambiar de 0 a 1 el bit de información que lleva el electrón.

Mientras la electrónica traslada la información cambiando el número y la energía de los electrones de un circuito, la naciente espintrónica codifica los datos en la orientación de los electrones y efectúa operaciones lógicas modificando dicha orientación. La compañía Motorola ha iniciado la producción en masa de chips de memoria magnética de acceso aleatorio (MRAM). A diferencia de las memorias al uso, los chips MRAM no pierden los datos al interrumpirse la corriente: los electrones conservan su espín hasta que se recupera la corriente.

Dado que las operaciones de cambio de espín consumen poca energía, los dispositivos espintrónicos requieren baterías muy livianas. Además, los chips pueden permanecer desconectados entre una y otra operación. Al cambiar el espín, la energía cinética de la partícula apenas si aumenta, por lo que los circuitos generan mínimo calor. Por si fuera poco, el proceso alcanza velocidades superlativas: se ha conseguido invertir la orientación del espín electrónico en breves picosegundos (billonésimas de segundo).

Sin embargo, todos los dispositivos espintrónicos fabricados hasta la fecha se basan en metales ferromagnéticos, que no se adaptan bien a las técnicas actuales de producción de microcircuitos. Construir imanes diminutos emplazados en millones de puntos en un chip y controlarlos individualmente entraña enormes dificultades técnicas. (Para pasar de la electrónica a la espintrónica no basta con sustituir los campos eléctricos por campos magnéticos; se trata de un proceso bastante más complejo.)

## De los bits a los fits

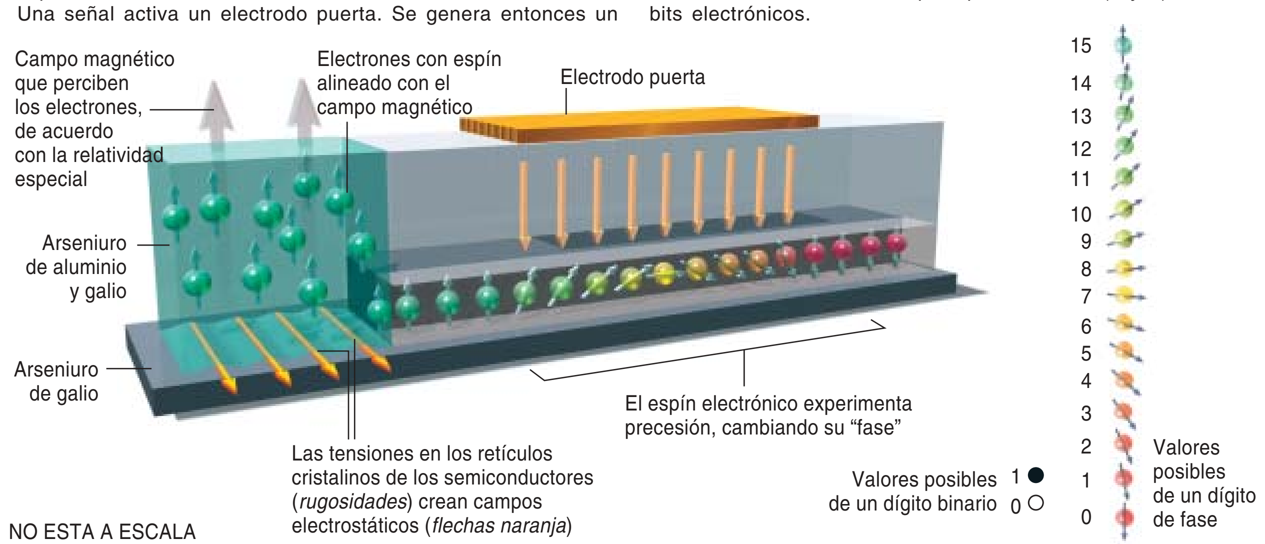
Demos paso a Einstein y su curiosa noción de que un campo eléctrico ofrece un aspecto magnético a un electrón que se mueve a gran velocidad. En un trabajo publicado en enero, el grupo de Awschalom demostró que al extender una sobre otra dos capas de semiconductores de composición distinta, las tensiones que aparecen en las mallas cristalinas generan en el chip un campo eléctrico interno. Este cuenta con puntos altos y puntos bajos, que operan a modo de un corral donde apriscar los electrones en su paso a través del semiconductor. Debido a la relatividad, ese campo eléctrico ofrece un aspecto parcialmente magnético al electrón

MICROCHIPS RELATIVISTAS

### Más allá del cómputo binario

La relatividad especial sugiere microcircuitos de nuevo cuño, basados en el espín electrónico. Estos dispositivos podrían fabricarse en las plantas ya existentes. Al moverse a gran velocidad a través del chip, los electrones experimentan un efecto relativista: sienten los campos eléctricos como si se tratara, en parte, de campos magnéticos. En respuesta a este fenómeno, alinean con el campo magnético el eje de su espín.

Una señal activa un electrodo puerta. Se genera entonces un campo eléctrico que resulta, para electrones rápidos, parcialmente magnético e induce un movimiento de precesión en su eje de espín. Después, la puerta se desactiva, dejando fijos los espines electrónicos en una nueva dirección, o "fase". Variando la velocidad de los electrones y la intensidad del campo eléctrico en la puerta, el chip relativista podría crear *fits* (dígitos de fase) espintrónicos, cuya gama de valores posibles sería mucho más amplia que la binaria (0 y 1) de los bits electrónicos.




ALFRED T. KAMAJIAN

que lo atraviesa, cuyo espín empieza a mostrar un movimiento de precesión, semejante al de una peonza.

Se conocen dos formas de controlar los electrones. Una de ellas consiste en variar el voltaje, lo que repercute en la velocidad de estas partículas. Cuanto mayor es esta velocidad, tanto más intenso les parece el campo magnético efectivo y tanto más rápida es la precesión de su espín. La otra forma se basa en aprovechar que la tensión cristalina del semiconductor y, por tanto, el campo que genera, varían con la dirección; basta entonces con diseñar cuidadosamente la morfología del conductor que define la trayectoria de los electrones.

En su trabajo, los autores describieron la forma de usar impulsos de láser para alinear la orientación de los electrones entrantes —obteniendo de ese modo los bits "espintrónicos"—, así como para medir su espín. El grupo de Awschalom resolvió también el siguiente paso: lograr que los procesos de creación, desplazamiento y detección se efectuaran todos en un solo elemento electrónico. Diseñaron un dispositivo que se vale de voltajes pequeños, los mismos que hoy utilizan los chips habituales, los CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario). Al impactar en la parte del semiconductor sometida a tensión, los electrones polarizan su espín al instante. Así, activando o desactivando los electrodos-puerta, se consigue voltear su espín hacia delante o atrás, de forma coherente.

La "coherencia" constituye un aspecto clave en este contexto, pues brinda la posibilidad de crear chips espintrónicos, es decir, pasar de los bits ("dígitos binarios", que sólo toman dos valores) a los "fits" ("dígitos de fase", que pueden tomar un amplio abanico de valores). La fase de un electrón corresponde a la dirección en la que apunta su espín. Imaginémoslo como la aguja de una brújula. Si un microchip distinguiera grupos de electrones con espín orientado sea al norte, al sur, al este o al oeste, cada fit podría representar no sólo un 0 o un 1, sino también un 2 o un 3.

Cuanto mayor sea la precisión con la que se lee la fase, más podrá aumentarse la densidad de almacenamiento de datos. Merced a decenios de trabajos dedicados a la obtención de imágenes por resonancia magnética, en la que se detecta el espín de los núcleos atómicos, hoy conocemos la forma de medir esos ángulos con una precisión elevada.

Con todo, no se ha logrado todavía fabricar un transistor espintrónico completo y operativo. (Los transistores resultan indispensables porque amplifican las señales y permiten que circulen intactas a través de largas series de puertas en un microprocesador.) Pero no tardarán en llegar; los expertos ya están planeando qué hacer con ellos.

En el año 2003, Reinhold Koch y sus colaboradores del Instituto Paul Drude de Berlín, dedicados a la electrónica del estado sólido, construyeron un elemento lógico espintrónico que cambia de función según las instrucciones de un programa informático: en un momento dado puede operar como una puerta booleana Y, y pocos nanosegundos más tarde convertirse en una puerta O, en una puerta NO-O (negación de la O) o en una NO-Y (negación de la Y).

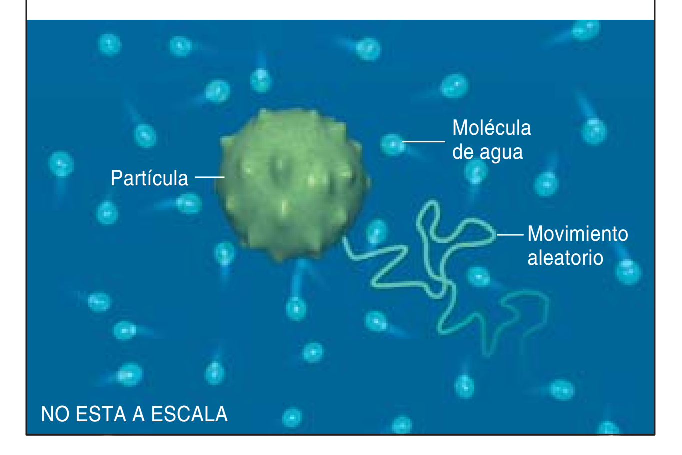
Un ordenador capaz de reconfigurase a sí mismo según las necesidades de cada momento ofrecería una potencia incalculable. Koch ha diseñado un sumador completo (el componente lógico más común en los ordenadores) a partir de sólo cuatro elementos espintrónicos, en lugar de los dieciséis transistores electrónicos que se requieren de ordinario. La versión espintrónica consumiría alrededor de un 85 por ciento menos de energía y ocuparía un 75 por ciento menos de espacio; aun así, operaría con la celeridad de los diseños actuales de silicio más avanzados.

Nos hallamos lejos de dominar los efectos relativistas en el diseño de microchips espintrónicos. Pero la técnica derivada de la física einsteiniana podría abrir nuevas avenidas, precisamente cuando las carreteras actuales están repletas de obstáculos. Quizá solventaría el problema del espacio, pues cuanto menor es el dispositivo, mejor opera la espintrónica.

MOLECULAS EN MOVIMIENTO

### Zarandeadas por el caos

En 1827, el botánico Robert Brown, mientras examinaba una gota de agua a través del microscopio, advirtió diminutos granos de polen que danzaban como si estuvieran vivos. En 1905, Einstein dedujo que era la acción de las moléculas de agua, que bombardeaban las partículas en suspensión, la causa de aquel movimiento aleatorio. Aunque dichas moléculas son invisibles al microscopio, su abundancia y rapidez bastan para empujar un cuerpo de tamaño bacteriano cuando colisionan con el mismo. Con el tiempo, éste traza un zigzagueo errático.




ALFRED T. KAMAJIAN

## Trinquetes brownianos

Einstein debe su fama, sobre todo, a la descripción de entidades de gran tamaño: la velocidad de la luz, el sino del universo o la naturaleza del tiempo. Pero en 1905, su atención se centraba también en el mundo submicroscópico. En su tesis doctoral, perfeccionó anteriores estimaciones del tamaño de las moléculas. En *Annalen der Physik* publicó un artículo sobre las ecuaciones que gobiernan el "movimiento browiano", un fenómeno microscópico que mantenía intrigados a los expertos desde que el botánico Robert Brown lo señaló en 1827.

Brown había observado partículas diminutas —granos de polen— en suspensión acuosa, que se movían

de forma azarosa. Pensar que dichas entidades estaban vivas constituía la explicación más sencilla, pero Brown demostró que con la materia inerte (realizó la misma prueba con piedra pulverizada) ocurría lo mismo. En los albores del siglo XX, algunos teóricos conjeturaban que eran fuerzas eléctricas las que empujaban a las partículas de un lado a otro; hubo además quienes pensaron que se debía a la evaporación, a la convección o a la luz, entre otros fenómenos.

Einstein propuso que una partícula se mueve sin rumbo aparente en un líquido, debido, sobre todo, a que las moléculas de éste la "bombardean" por todos lados. De hecho, señaló, el fenómeno ofrece claros indicios a favor de la hipótesis, entonces controvertida, de que el calor se debe al mero movimiento aleatorio de las moléculas. En su artículo, Einstein dedujo parte de la teoría matemática que subyace al movimiento browniano.

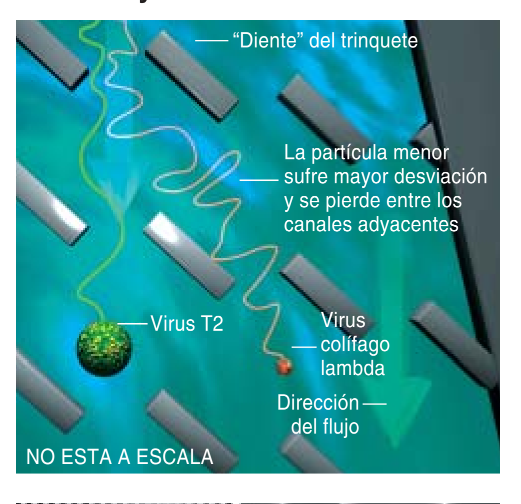
Esa rama de las matemáticas ha resultado de gran utilidad para el análisis de los mercados de valores, para describir la difusión a través de líquidos o gases y, en fecha reciente, para diseñar "trinquetes brownianos". Cuanto más liviana es una partícula, más sensible se revela su movimiento a las colisiones con las moléculas del medio (más caótica se dibuja su trayectoria). Los trinquetes brownianos, versiones microscópicas de las ruedas dentadas de un malacate, aprovechan esta propiedad para transformar un movimiento aleatorio en un desplazamiento sistemático; a imagen del trinquete, que aprovecha el movimiento de la muñeca para dar cuerda al reloj. Ello les permite clasificar virus según el tamaño o separar contaminantes del agua, por ejemplo.

En el año 2003 se fabricaron dos de estos dispositivos mediante técnicas muy similares a las de los microchips. James C. Sturm y sus colaboradores, de la Universidad de Princeton, construyeron un trinquete browniano que opera como un billar romano (juego parecido a la clásica "máquina del millón" o *pinball*) del tamaño de una uña. Grabaron un canal en una oblea de silicio, pero dejaron en pie, a distancias regulares, columnatas de pilares de sólo seis micras de ancho y tres de alto; éstos mantienen una inclinación de 45 grados y se encuentran de tal modo separados que, cuando un líquido fluye por el canal, las partículas que contenga topen con ellos y se desvíen hacia la derecha. Cuanto menor sea la partícula, mayor será su desplazamiento y más a la derecha llegará.

En diciembre de 2003, Sturm publicó los resultados de cierto ensayo interesante: hizo pasar a través del trinquete una mezcla de agua y ADN de dos tipos de virus. El dispositivo consiguió separar el genoma vírico más pesado del más liviano. Esta técnica einsteiniana reduciría en dos tercios el tiempo que los mé-

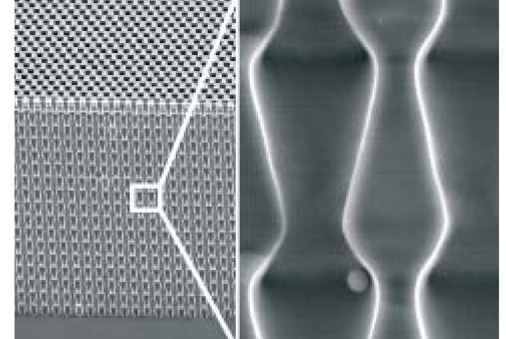
TRINQUETES BROWNIANOS

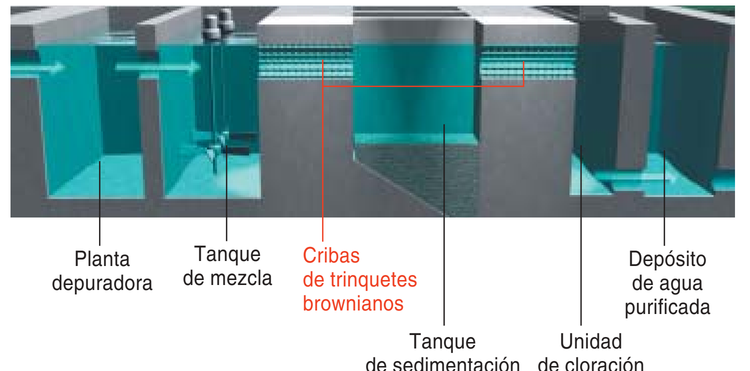
## Cribas y clasificadores más eficaces




El movimiento de las partículas en suspensión describe trayectorias caóticas. Los trinquetes brownianos aprovechan esta propiedad para transformar, mediante obstáculos asimétricos, el movimiento aleatorio en un desplazamiento sistemático. Uno de los diseños recuerda a un diminuto billar romano (juego parecido a la clásica "máquina del millón" o *pinball*). Al pasar el fluido —plasma sanguíneo, por ejemplo— por el canal, las partículas microscópicas en suspensión chocan contra columnas dispuestas al bies, que vienen a operar como los dientes de un trinquete (*izquierda*). Así podrían clasificarse distintos virus; según su tamaño, acabarían en una zona u otra en el fondo del dispositivo.

Un equipo de ingenieros alemanes ha desarrollado otro tipo de trinquete browniano, perforando millares de canales en una oblea de silicio (*abajo, a la izquierda*). Se induce el paso reiterado, de uno a otro lado de los poros, de agua contaminada con hollín, materia orgánica u otros compuestos fragmentados en pequeñas partículas. Los contaminantes, bombardeados, se atascan en los cuellos, que los van guiando hacia adelante; de forma gradual, migran de un lado al otro de la oblea. En teoría, las plantas purificadoras de agua (*abajo, a la derecha*) podrían incorporar tales cribas brownianas en sus tuberías.






ALFRED T. KAMAJIAN

todos actuales requieren para separar fragmentos grandes de ADN; podría incluso resultar más económico y transportable.

Sven Matthias y Frank Müller han construido en el Instituto Max Planck de Física de Microestructuras, en Weinberg, otro tipo de trinquete browniano, parecido a una esponja: cuenta con millares de canales paralelos perforados en una delgada oblea de silicio. Cada orificio se ensancha y se estrecha, formando una serie de cuellos de botella.

Matthias y Müller encajaron su trinquete en mitad de un plato lleno de agua y cuentas microscópicas de plástico. El extremo inferior del plato se movía arriba y abajo, obligando al agua a ir y venir a través del trinquete. Al pasar las cuentas por los canales, el movimiento browniano las empujaba contra los cuellos, impidiendo que la corriente las arrastrara hacia fuera otra vez. De forma gradual, casi todas las cuentas migraron, a través del trinquete, hasta la parte superior del plato: en la parte inferior sólo quedó agua limpia. Dado que su escala es variable —puede adaptarse a grandes tamaños—, este trinquete ofrece un nuevo método para separar virus, fragmentos celulares, hollín u otros contaminantes sólidos, de un fluido en circulación continua.

## Prospección mediante agregados atómicos

Einstein pugnó contra el carácter extraño de las reglas cuánticas que gobiernan el reino atómico. El protagonismo que éstas conceden al azar y a la incertidumbre ofendía su intuición. Sin embargo, a pesar de la desazón que le producían las implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica, contribuyó al desarrollo de esta teoría con aportaciones seminales.

Así, por ejemplo, en 1925, al leer un artículo de Satyendra Nath Bose sobre la estadística de los fotones, se percató de que, si se enfriaban átomos a temperaturas que rozaran el cero absoluto, al apiñarse éstos unos junto a otros ocurriría algo insólito: los efectos cuánticos obligarían a los átomos a condensarse temporalmente en un "superátomo". Marcharían al unísono, de forma muy parecida al ordenado vuelo en formación de los fotones que integran un haz de láser.

Los láseres se han convertido en unos de los dispositivos de mayor utilidad; existen buenas razones para creer que los "láseres de átomos" no serán menos. Pero el condensado de Bose-Einstein —el agregado de átomos ultrafríos— no pasó de curiosa especulación teórica durante más de 70 años. En junio de 1995, Eric A. Cornell y Carl E. Weiman, del JILA en Boulder, lograron que 2000 átomos de rubidio se fundieran unos con otros, tal y como Einstein había previsto. Seis años después, ambos y Wolfgang Ketterle, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, compartieron el premio Nobel por su hazaña.

Cornell y sus alumnos del JILA están ahora ultimando los detalles de un chip que guía condensados por su superficie. Se trata de un interferómetro atómico. Escinde y recombina los agregados: detecta la aceleración y la rotación de los átomos, con mayor sensibilidad aún que las técnicas basadas en rayos láser.

Estos dispositivos podrían instalarse en la panza de los aviones para detectar ligeras variaciones en la fuerza y la dirección de la gravedad; a fin de cuentas, puede ésta considerarse una aceleración. Tales fluctuaciones revelan estructuras ocultas, situadas a gran profundidad bajo tierra o bajo el agua: yacimientos petrolíferos, filones de minerales metálicos, cavernas, túneles, búnkeres y otras alteraciones del subsuelo.

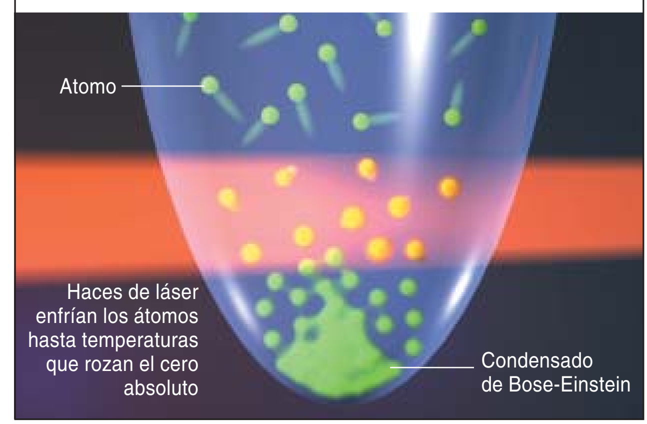
Los interferómetros atómicos aumentarían también la precisión de los mejores sensores rotacionales —en la actualidad giróscopos mecánicos— entre 100 y 1000 veces. El desarrollo de los giróscopos reviste especial interés para la navegación a la estima (la que determina la posición ocupada en un momento dado a partir del rumbo trazado y la distancia desde la última posición conocida). Por supuesto, pudiendo recurrir a la red de satélites GPS, ya casi nadie opta por este tipo de navegación. Aun así, todavía se requiere un buen giróscopo si uno lleva largo tiempo dentro de un bote de titanio sumergido a gran profundidad y no se le permite hacer ningún ruido. (No es casual que la Marina estadounidense financie gran parte del proyecto. Los militares se hallan también muy interesados en el desarrollo de sistemas de navegación de alta precisión que operen incluso cuando las señales de GPS sufran perturbaciones.)

Como su nombre indica, un interferómetro atómico pone en contacto a dos agregados atómicos y mide el patrón de interferencia que éstos generan. Lo mismo que cualquier otro objeto cuántico, los condensados de Bose-Einstein pueden desarrollar un comportamiento ondulatorio o corpuscular. Cuando un condensado se escinde en dos, ambas piezas parten con la misma longitud de onda y la misma fase. Pero si recorren caminos distintos, puede que al recombinarse ya no lleven el mismo paso. Las crestas y los valles de sus ondas interferirán, formando un patrón de franjas: zonas que

FORMACION DE UN AGREGADO ATOMICO

### Un nuevo estado de la materia

A una milmillonésima de grado sobre el cero absoluto, se forman los condensados de Bose-Einstein, los objetos más fríos del universo. Los átomos se enfrían y comprimen mediante láseres y campos magnéticos, hasta que los efectos cuánticos sincronizan su comportamiento. Los átomos del agregado se mueven al unísono, como si constituyeran un solo átomo, gigantesco.




NO ESTA A ESCALA

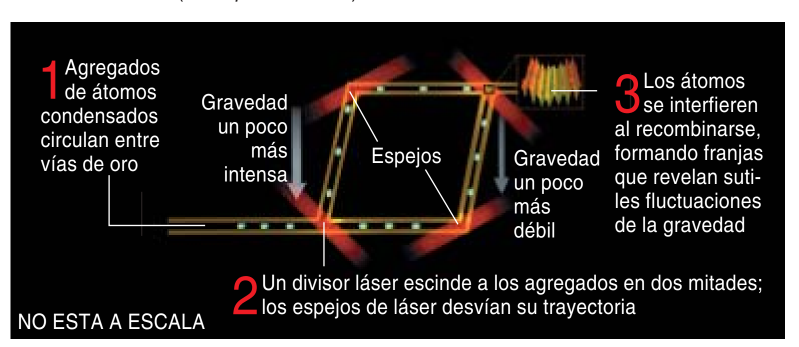
ALFRED T. KAMAJIAN

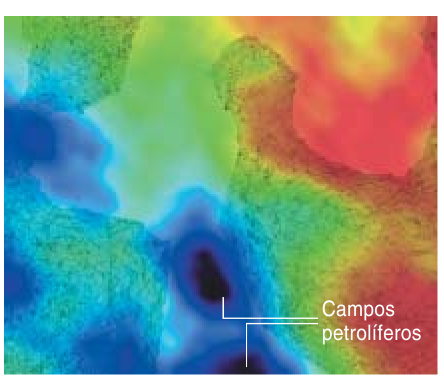
INTERFEROMETROS ATOMICOS

## Tornar visible lo invisible

Las propiedades de los condensados de Bose-Einstein, similares a las de la luz láser, podrían hallar aplicación en los sensores de gravedad y en los giróscopos. Los agregados atómicos se escinden y se recombinan en un interferómetro (*abajo*). Los átomos se conducen mediante fuerzas magnéticas; inciden luego en un divisor y en espejos formados por ondas estacionarias de luz láser. En principio, las dos mitades del condensado marchan al unísono y mantienen el mismo paso durante su recorrido; después, al reunirse, generan un patrón de interferencia. Pero cualquier discrepancia, por leve que sea, en las rutas recorridas por cada mitad —débase a un sutil gradiente en la fuerza de la gravedad o a una ligera rotación del dispositivo— provoca un corrimiento de las franjas de interferencia. A largo plazo, los interferómetros atómicos instalados en aviones (*arriba, a la derecha*) podrían detectar las "signaturas" gravitatorias de depósitos profundos de petróleo o de menas metálicas (*abajo, a la derecha*). Los aparatos militares podrían incluso dotarse de un escáner gravitatorio de Bose-Einstein para identificar túneles o búnkeres subterráneos (*no representadas*).






ALFRED T. KAMAJIAN

contienen gran cantidad de átomos separadas por otras casi vacías.

En fecha reciente, Ketterle, Mark A. Kasevich, de la Universidad de Stanford, y otros han construido interferómetros atómicos operativos. Sin embargo, cuentan con un inconveniente: ocupan casi una habitación entera; ello se debe a que la escisión y recombinación de los agregados atómicos se produce en el interior de una gran cámara de vacío. Cornell y Dana Anderson han diseñado versiones más fáciles de transportar.

El interferómetro puede miniaturizarse hasta alojarlo en un pequeño chip. Ying-Ju Wang, del equipo de Cornell, muestra una pieza de vidrio del tamaño de un portaobjetos de microscopio. A lo largo de este "porta" corren dos tiras paralelas de oro —una suerte de raíles en miniatura— por donde circulan corrientes eléctricas de igual intensidad; los campos magnéticos que éstas generan se cancelan mutuamente a lo largo de la línea media central. Los átomos de rubidio que se utilizan prefieren quedarse en la zona donde el campo magnético toma el valor mínimo; por eso bajan céleres por ese canal, donde el campo es nulo.

Los raíles de oro llegan a una bifurcación: el divisor. En este punto se genera una onda estacionaria de luz láser, que opera como una red de difracción: separa hacia la izquierda la mitad de los átomos del condensado y hacia la derecha la otra mitad. Los agregados se distancian unas 300 micras; después, topan con otras ondas estacionarias, que actúan a modo de espejos, desviando los átomos hacia atrás. Luego, las dos mitades se reencuentran, se solapan e interfieren. Una cámara especial controla la posición de las franjas del patrón de interferencia.

Si bien el componente esencial del interferómetro cabe en una mano, el aparato completo ocupa todavía la superficie entera de una mesa de laboratorio. No todos los elementos pueden miniaturizarse; pensemos, por ejemplo, en el sistema de refrigeración por láser, que frena la velocidad de los átomos desde la temperatura ambiente hasta unas milmillonésimas de grado sobre el cero absoluto.

Tal vez, pues, un giroscopio atómico no llegue a caber en un reloj de pulsera o en un teléfono móvil. Pero los condensados de Bose-Einstein podrían acabar volando en el morro de los aviones o navegando en las quillas de los submarinos. Si la historia de los láseres sirve de ejemplo, en el futuro se encontrarán muchas más aplicaciones a este nuevo estado de la materia de las que hoy alcanzamos a imaginar.

## Bibliografía complementaria

COHERENCE WITH ATOMS. M. A. Kasevich en *Science*, vol. 298, páginas 1363-1369; 15 de noviembre de 2002.

ASYMMETRIC PORES IN A SILICON MEMBRANE ACTING AS MASSIVELY PARALLEL BROWNIAN RATCHETS. S. Matthias y F. Müller, en *Nature*, vol. 424, páginas 53-57; 3 de julio de 2003.

TILTED BROWNIAN RATCHET FOR DNA ANALYSIS. L. R. Huang et al. en *Analytical Chemistry*, vol. 75, páginas 6063-6967; 15 de diciembre de 2003.

## Sumideros de carbono

*En manglares de Tabasco*

De acuerdo con la investigación reciente, la temperatura media de la Tierra ha aumentado en los últimos años algunas décimas de grado. Sin embargo, dada la complejidad de los factores que afectan al clima, resulta difícil saber si dicho ascenso corresponde a la variabilidad natural o si se debe al efecto invernadero de naturaleza antropogénica. Uno de los principales responsables del calentamiento global es el dióxido de carbono ($CO_2$), cuya concentración atmosférica está creciendo desde 1950. Dicho aumento se atribuye a dos factores principales: el consumo de combustibles fósiles y los cambios en la cobertura vegetal operados por el uso del suelo.

El efecto sumidero de las plantas, que capturan y almacenan el $CO_2$ atmosférico en forma de carbono orgánico, puede constituir una de las opciones alternativas más económicas para reducir la concentración de ese gas de invernadero. Así, cuando un suelo agrícola se convierte en forestal, éste acumula un promedio de 0 a 7 toneladas de carbono orgánico por hectárea y año. Si el cambio de uso del suelo se da en regiones templadas, el secuestro de carbono orgánico oscila entre 0,2 y 0,6 toneladas por hectárea y año; en el caso de suelos tropicales y subtropicales, estos valores varían entre 1,0 y 7,4.

La reserva principal de carbono de nuestro planeta se encuentra en el suelo; se estima en 1,5 billones de toneladas, es decir, cerca de 2,1 veces más que la reserva atmosférica y cerca de 2,7 veces más que la de toda la flora terrestre. Esta cantidad puede resultar todavía mayor en los suelos orgánicos; en los histosoles hallamos una concentración de carbono de 133,7 kilogramos por metro cuadrado. La acumulación aquí de carbono obedece a tres factores: la composición de su materia orgánica, un *p*H ácido y unas condiciones anaeróbicas. Pese a su extensión limitada —cubren cerca de un 1 por ciento de los suelos del mundo—, retienen el 23 por ciento del total de carbono.

En histosoles con vegetación de mangle, el promedio de descomposición (transformación del carbono de la materia orgánica en partículas) es bajo. Ello se debe a las condiciones de inundación, salinidad y material vegetal de difícil degradación química. Allí, por tanto, el potencial de almacenamiento de carbono superará el de los ecosistemas de agua dulce. La composición de los residuos vegetales y el incremento de la salinidad repercuten en el flujo superficial del $CO_2$ y del carbono orgánico disuelto durante la descomposición del residuo vegetal. El importante secuestro de carbono que realizan las plantas halófitas nos mueve a considerar buenos sumideros los sistemas salinos.

Se ha cuantificado la reserva de carbono en suelos orgánicos de humedales en el oeste del estado mexicano de Tabasco. Allí el carbono alcanza concentraciones de hasta un 55 por ciento. Se trata de una acumulación que viene favorecida por la precipitación, el drenaje deficiente y la velocidad de descomposición de los materiales orgánicos. Dichos suelos, que ocupan unas 378.392 hectáreas, se encuentran principalmente en ecotonos, zonas





La fluctuación de agua salina favorece la acumulación de carbono en manglares de Tabasco.

de transición entre un sistema terrestre y uno acuático.

La proporción de materia orgánica (restos de plantas depositados en el agua) oscila entre un 20 y un 30 por ciento. Además, esta zona se caracteriza por presentar superficies inundadas e inundables durante la mayor parte del año, con influencia de aguas salobres. Su fisiografía muestra un relieve cóncavo y un drenaje natural deficiente, sin salida para el excedente acuoso. Las especies vegetales predominantes están adaptadas a condiciones de anegamiento. Destacan los mangles rojo (*Rhizophora mangle*), blanco (*Laguncularia racemosa*) y prieto (*Avicennia germinans*), que medran en las inmediaciones de los ríos Tonalá y Chicozapote, y la laguna El Yucateco. La distribución horizontal de los mismos depende de su capacidad para adaptarse a las condiciones de inundación y salinidad.

De acuerdo con el grado de descomposición de los materiales orgánicos, estos suelos se consideran histosoles sápricos (HSsa). El contenido total de carbono en histosoles con vegetación de mangle blanco se estima en 764,1 toneladas por hectárea, a dos metros de profundidad: ese valor refleja el largo tiempo que la naturaleza ha invertido en acumular esta cantidad de carbono. La acumulación de un metro de turba requiere un promedio de 1500 años. La reserva de carbono en estos ambientes depende de la salinidad, la inundación permanente y otros factores ambientales que limitan la mineralización de la materia orgánica, lo cual se traduce en un mayor grosor de los materiales orgánicos y en una mayor reserva de carbono. Sus dos metros de material totalmente descompuesto en condiciones tropicales indican que estos ecosistemas han permanecido en equilibrio durante miles de años. Asimismo, el contenido de carbono es mayor que el observado en otras regiones con diferentes usos del suelo.

Por tanto, los manglares de Tabasco ofrecen un gran potencial como sumideros de carbono y pueden desempeñar un papel importante en la regulación de la concentración del $CO_2$ atmosférico. El conocimiento sobre el contenido de carbono de los histosoles formados a partir de manglares puede contribuir a la estimación del secuestro, actual y futuro, de este elemento por los ecosistemas tropicales. Añádase que, cuando se drenan estos suelos se dejan expuestos a condiciones aeróbicas, pueden llegar a oxidarse y en el proceso liberar grandes cantidades de carbono a la atmósfera, además de perderse un ecosistema que difícilmente se regenerará.

ELVIA MORENO CÁLIZ,
DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ,
M.ª DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA
Colegio de Postgraduados, México

## Mediterráneo noroccidental

*Relieve submarino*

El mar Mediterráneo es el último resto del antiguo océano Tethys, que enlazaba el paleo-Atlántico con el paleo-Indico. El empuje de Africa hacia el norte y los esfuerzos tectónicos regionales, que se traducen en la actividad sísmica y volcánica característica de buena parte de la cuenca mediterránea, fueron estrangulando al viejo Tethys hasta aislarlo, casi por completo, del océano mundial.

A través del estrecho de Gibraltar, el mar Mediterráneo intercambia agua, energía y nutrientes con el océano Atlántico. Pero esa conexión se interrumpió al desecarse el Mediterráneo, hace unos cinco millones de años, en el período Mesiniense. Durante dicho período se depositaron en el lecho de la cuenca paquetes de espesor kilométrico de sales y sulfatos, fácilmente deformables bajo el peso de los sedimentos más recientes, acumulados cuando las aguas volvieron a cubrir el Mare Nostrum.

Las fluctuaciones globales del nivel del mar propias de los últimos dos millones de años han dejado su huella, sobre todo en las áreas más someras, en la plataforma continental, y han determinado la migración cíclica de la línea de costa y de las desembocaduras de los ríos, condicionando así el desarrollo de deltas y playas.

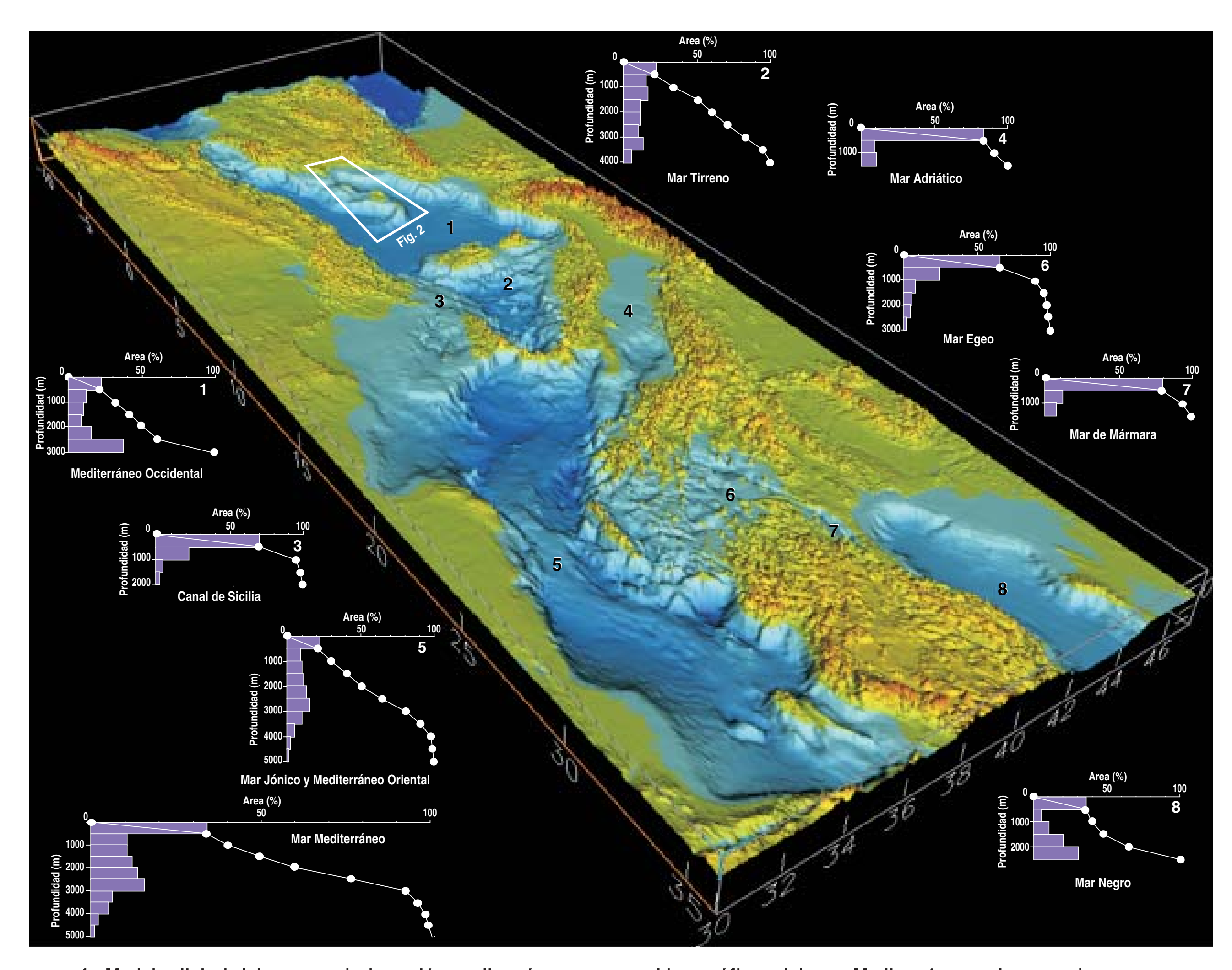
Después de una fase de inundación máxima, hace unos 7000 años, el nivel del mar alcanzó su cota actual hace unos 4500 años, momento a partir del cual habría empezado a configurarse la moderna línea de costa. El fruto de esta larga y convulsa historia, desde las grandes profundidades hasta la recortada línea de costa actual, es el Mediterráneo, un mar de mares.

### *Las cuencas internas*

El Mediterráneo, con casi 2,6 millones de km$^2$, ocupa una superficie que es unas cuatro veces y media mayor que la península Ibérica. Está formado por varias subcuencas con dimensiones, fisiografía, edad y evolución geológica muy dispares entre sí. Su superficie se reparte entre el Mediterráneo occidental (que incluye el mar de Alborán, la cuenca Argelino-Balear, el golfo de Valencia, el golfo de León y el mar Ligur), el mar Tirreno, el canal de Sicilia, el mar Adriático, el mar Jónico y el Mediterráneo oriental, el mar Egeo, el mar de Mármara y el mar Negro. Ocho subdivisiones en total.

Las dos cuencas mayores son, por este orden, la del mar Jónico y el Mediterráneo oriental, y la del Mediterráneo occidental. Las más profundas, con más de 5000 m y 4000 m, respectivamente, son la del mar Jónico y el Mediterráneo oriental, y la del mar Tirreno. Así, junto a cuencas en las que la mayor parte de su superficie corresponde a profundidades de menos de 1000 m, como el canal de Sicilia, el mar Adriático, el mar Egeo y el mar de Mármara, hay otras cuencas en las que las profundidades abisales ocupan una parte notable de su superficie. La profundidad media resultante de esta compleja combinación se cifra en unos 1500 metros.

El Mediterráneo occidental se caracteriza por una amplia llanura batial. Situada a más de 2500 m de profundidad, ocupa el 40 % de su superficie. El resto de los fondos




1. Modelo digital del terreno de la región mediterránea y curvas hipsográficas del mar Mediterráneo y de sus subcuencas. Imagen generada por el GIC en Geociencias Marinas de la Universidad de Barcelona.

marinos del Mediterráneo occidental está constituido por plataformas someras, taludes, glacis y montes submarinos de origen volcánico y diapírico. Algunos taludes forman verdaderos escarpes submarinos, con más de 2000 m de desnivel, como los que se extienden desde el noreste y sur de Menorca hasta el sur de Murcia. Más hacia el oeste, el mar de Alborán presenta una complejidad notable, con dorsales y montes submarinos, en una de cuyas crestas se sitúa el islote de Alborán (*véase la figura 1*).

### *Batimetría de multihaz en el Mediterráneo noroccidental*

El Mediterráneo noroccidental comprende el golfo de León, el golfo de Valencia, el promontorio balear y los sectores adyacentes. Esta área constituía potencialmente un lugar idóneo para el despliegue de sistemas de batimetría de multihaz por varias razones: 1) en ella desembocan el Ródano y el Ebro, dos de los principales ríos que vierten al Mediterráneo; 2) en ella se sitúa el promontorio balear, una abrupta prolongación de las cordilleras Béticas; 3) abundan montes y cañones submarinos, y 4) existen potentes depósitos evaporíticos mesinienses, susceptibles de dar lugar a estructuras de deformación.

Por otra parte, las implicaciones sociales y económicas inherentes al conocimiento preciso de los fondos marinos de esta región son manifiestas. Por todo ello, se han llevado a cabo en la misma numerosas campañas oceanográficas cuyo objetivo principal ha sido la cartografía del relieve submarino y la interpretación de los procesos que lo han generado. El instrumento primordial para la adquisición de los datos necesarios han sido las sondas batimétricas de multihaz.

El primer mapa batimétrico efectuado en el Mediterráneo noroccidental con sistemas de multihaz, confeccionado por el equipo encabezado por Orsolini, no apareció hasta 1981-1982. Recubría sólo el sector oriental del golfo de León profundo. Desde los años noventa, investigadores franceses y españoles han ido completando la cartografía batimétrica de detalle del Mediterráneo noroccidental. Cabe destacar la labor del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar (IFREMER) en el golfo de León, la Universidad de Barcelona en el golfo de Valencia y el margen continental de Cataluña, y del Instituto Español de Oceanografía y el Institu-

## Batimetría de multihaz: cartografía de precisión del relieve submarino

Los sistemas de batimetría de multihaz están formados por un conjunto de haces que insonifican un sector del fondo marino cuya anchura depende del ángulo de abertura del conjunto de haces y de la profundidad de agua (*véase la figura 4*). Los hay portátiles y fijos, para aguas someras y para aguas profundas, para buques de superficie y para vehículos submarinos.

El buque oceanográfico *Hespérides* tiene instalados dos sistemas de batimetría de multihaz fijados al casco, uno fijo y otro retráctil, denominados EM12S y EM1002. El primero, con 120º de abertura y 81 haces, y con un ancho de barrido de 3,5 veces la profundidad de agua, se emplea para profundidades oceánicas, mientras que el segundo está diseñado para profundidades inferiores a 500 m y puede alcanzar anchuras de barrido iguales a 7,5 veces la profundidad de agua.

Los sistemas de superficie son muy sensibles a los movimientos del buque. Hay, pues, que realizar calibraciones y correcciones durante la adquisición y el procesado de los datos. Debe conocerse también la variación de la velocidad de propagación del sonido en el agua, ya que ese parámetro influye sobre la trayectoria de las ondas acústicas.

A medida que el buque avanza, va barriendo el fondo a lo largo de un pasillo. Mediante la realización de pasadas sucesivas solapantes, se consigue una cobertura total del área objeto de estudio. La cobertura diaria típica para un sistema EM12 es de unos 4000 $km^2$. Estos sistemas generan, por día, varios megabytes de datos. Además de la información de profundidad proporcionan información de reflectividad, dependiente de la naturaleza y la pendiente del fondo. Los datos pueden usarse para construir modelos digitales del terreno y productos derivados: mapas de pendientes, imágenes tridimensionales e imágenes combinadas (*figuras 2 y 3*).

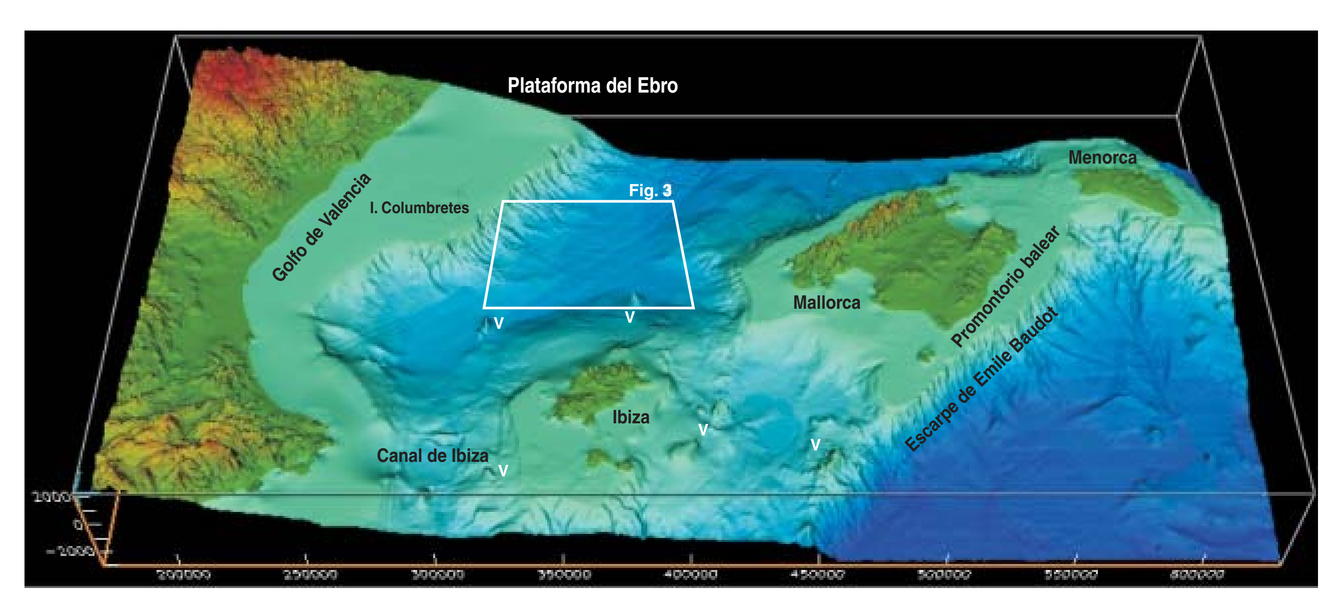
to Hidrográfico de la Marina, en el promontorio balear y sectores adyacentes. Dos buques oceanográficos equipados con modernos sistemas de batimetría de multihaz han desempeñado un papel destacado: *L'Atalante* y el *Hespérides*.

Gracias a este esfuerzo investigador, el Mediterráneo noroccidental constituye ahora una de las regiones del mundo cuyo relieve submarino se conoce mejor. Las instituciones citadas están elaborando en la actualidad una síntesis cartográfica de todo el Mediterráneo noroccidental.

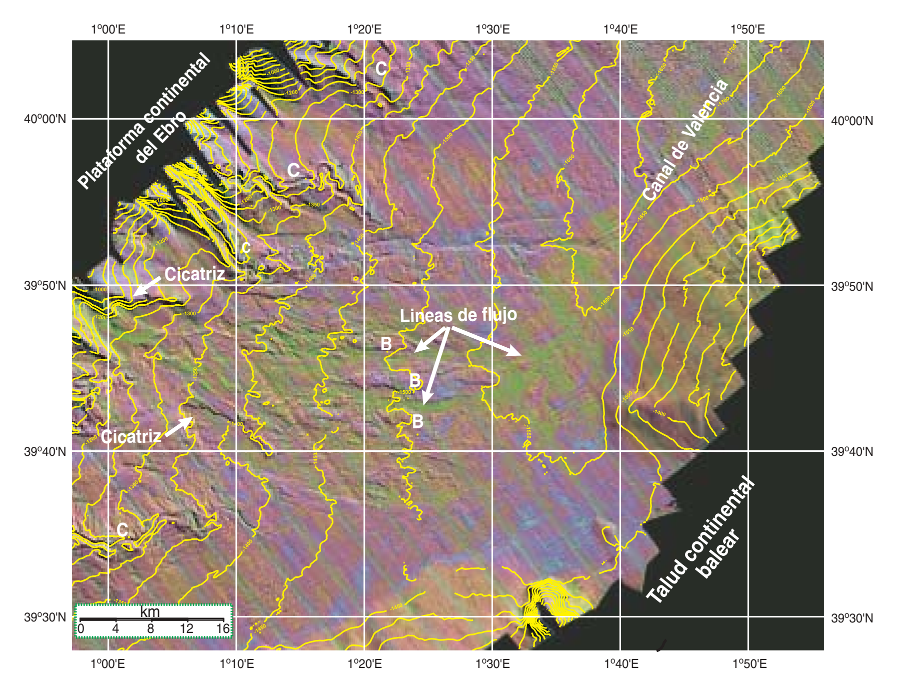
### *Resultados más destacados*

Los resultados obtenidos cambiarán nuestra visión de los fondos marinos del Mediterráneo noroccidental y condicionarán el uso futuro de los mismos. Conciernen a las cuestiones siguientes: segmentación del margen continental, desarrollo de plataformas continentales y sistemas sedimentarios profundos, abundancia de edificios volcánicos, cañones y deslizamientos submarinos y presencia de huellas de escape de fluidos.

Se ha observado la división longitudinal del margen continental en varios segmentos, probablemente de origen estructural, cuya morfología presenta rasgos distintivos. Singularizándolo, se diferencian el canal de Ibiza, con márgenes abruptos y un gran monte submarino en el centro; el segmento del Ebro, con una plataforma ancha y pequeños cañones escasamente encajados en el borde




2. Imagen tridimensional de la mitad meridional del Mediterráneo noroccidental, con el promontorio balear como elemento más destacado. La imagen se ha construido a partir de la integración de los modelos digitales del terreno de tierra y mar, este último confeccionado con datos x, y, z de batimetría de multihaz. V: volcanes submarinos. Imagen generada por el GIC en Geociencias Marinas de la Universidad de Barcelona (modificada a partir de otra de Acosta *et al.*).




3. Imagen del deslizamiento submarino BIG'95. Se han combinado datos batimétricos y de reflectividad del fondo. Los colores verdes corresponden a materiales de alta reflectividad (arenas y limos), mientras que los colores violáceos corresponden a materiales de baja reflectividad (arcillas). Obsérvense los bloques (*B*) desprendidos de la zona de cicatriz. También se pueden apreciar canales submarinos (*C*), algunos meandriformes, así como las huellas de las pasadas del buque, de orientación SE-NW. Imagen generada por el GIC en Geociencias Marinas de la Universidad de Barcelona, modificada a partir de Lastras *et al*.

de la misma; el segmento del Garraf-Maresme, con una plataforma de anchura intermedia y cañones lineales de mayores dimensiones que los del segmento del Ebro; el segmento de La Selva-Bajo Ampurdán, limitado por dos grandes cañones submarinos, los de Blanes y Palamós, cuyas cabeceras se sitúan prácticamente en la línea de costa; el segmento de la bahía de Rosas, con gradientes suaves en la plataforma y el talud superior, sin cañones actuales; el segmento del golfo de León, con una compleja red de cañones submarinos que convergen hacía el pie del talud; el margen septentrional del promontorio balear, con evidencias de desestabilización y sin cañones submarinos; y, por fin, el margen oriental y meridional del promontorio balear, con un neto control estructural visible en el escarpe de Emile Baudot, al sur, orientado de SW a NE.

Se ha registrado el desarrollo de amplias plataformas continentales y de grandes sistemas sedimentarios profundos, alimentados por el Ródano y el Ebro. En la plataforma externa del Ródano y en la del Maresme, se han identificado antiguas líneas de costa y relieves asociados formados durante el último mínimo eustático y la transgresión subsiguiente. Tales relieves probablemente existan en otros sectores de plataforma. Su cartografía permitirá reconstruir la evolución de la línea de costa durante los últimos milenios.

Abundan los edificios volcánicos submarinos, especialmente en el golfo de Valencia y en el promontorio balear. Cabe citar explícitamente el archipiélago de las Columbretes, el canal de Ibiza y un sector situado al este de Ibiza y al sudoeste de Cabrera.

Llama la atención la profusión de cañones submarinos de decenas a poco más de un centenar de kilómetros de longitud, con características dispares, desde escasamente encajados en el borde de la plataforma hasta profundamente encajados y con cabeceras próximas a la línea de costa; de tipo intermedio serían los cañones del golfo de León. Se han observado cañones rectilíneos, así como meandriformes. Los cañones del margen ibérico del golfo de Valencia vierten al canal de Valencia, un valle profundo que actúa de colector regional.



4. Sistema de batimetría de multihaz montado en el casco de un buque.

Entre los numerosos deslizamientos submarinos registrados destaca el denominado BIG'95, que afecta una área de 2000 km$^2$ frente a las islas Columbretes, cuatro veces la superficie de la cercana isla de Ibiza. Se han identificado otros deslizamientos en los taludes de Ibiza y Mallorca, en los márgenes del Ebro y Cataluña, y en el talud del golfo de León.

Por último, se han localizado numerosas huellas de escape de fluidos en el lecho marino, constituidas por depresiones de hasta 500 m de diámetro y más de 50 m de profundidad. Abundan en el canal de Ibiza, en el promontorio balear y en el talud del golfo de León.

Como se refleja en las ilustraciones, un conocimiento general integra otro más preciso, y éste a su vez otro aún más detallado y así sucesivamente hasta alcanzar la máxima resolución posible, prácticamente centimétrica, que permiten los modernos sistemas de batimetría de multihaz.

MIQUEL CANALS
y JOSÉ LUIS CASAMOR
Grupo de Investigación Consolidado
en Geociencias Marinas,
Universidad de Barcelona

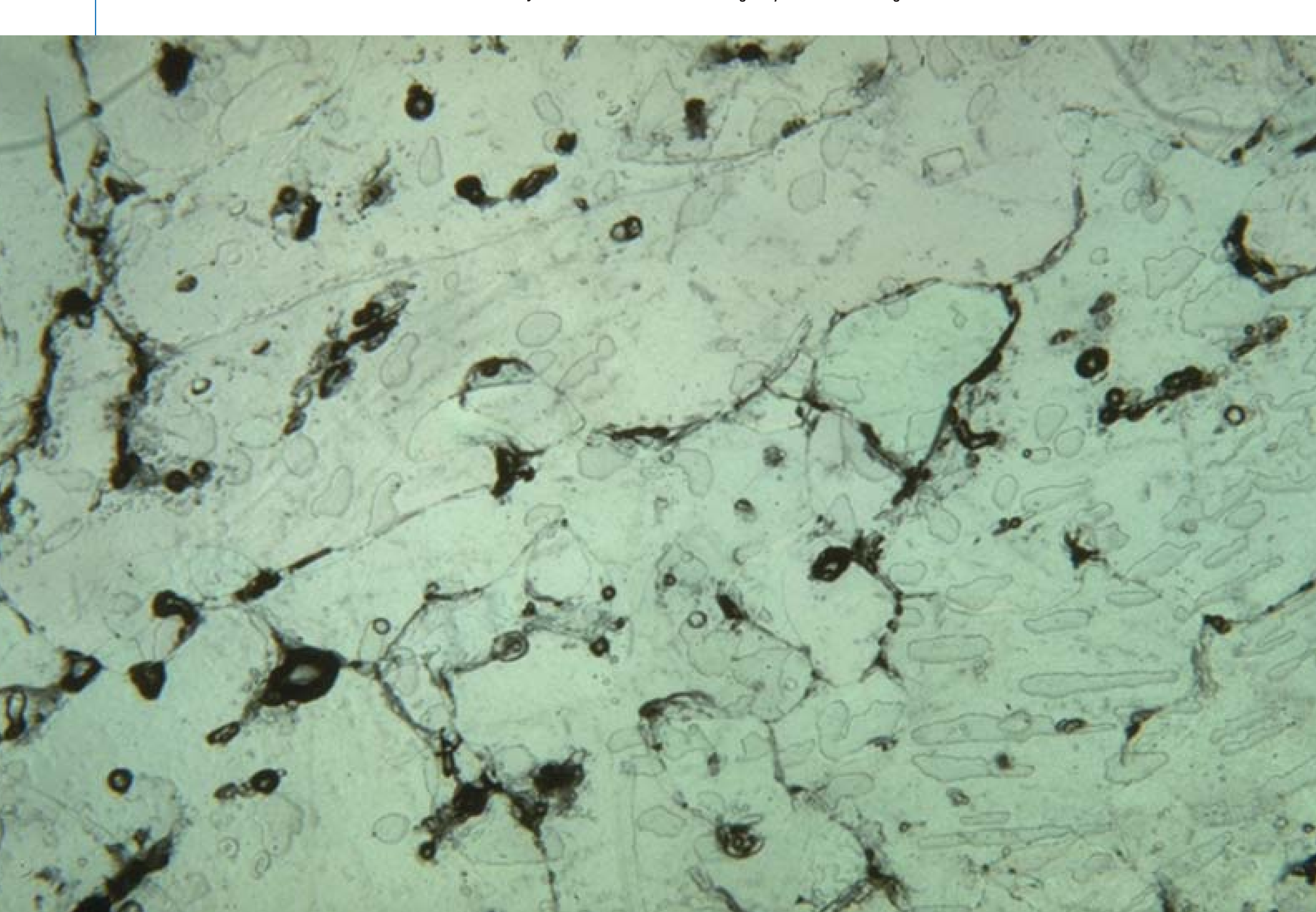
Anna Ceravalls, Diana Horta, David Rodríguez,
Josep-Maria Gasol y José Manuel Fortuño

## Vivir en canales de hielo

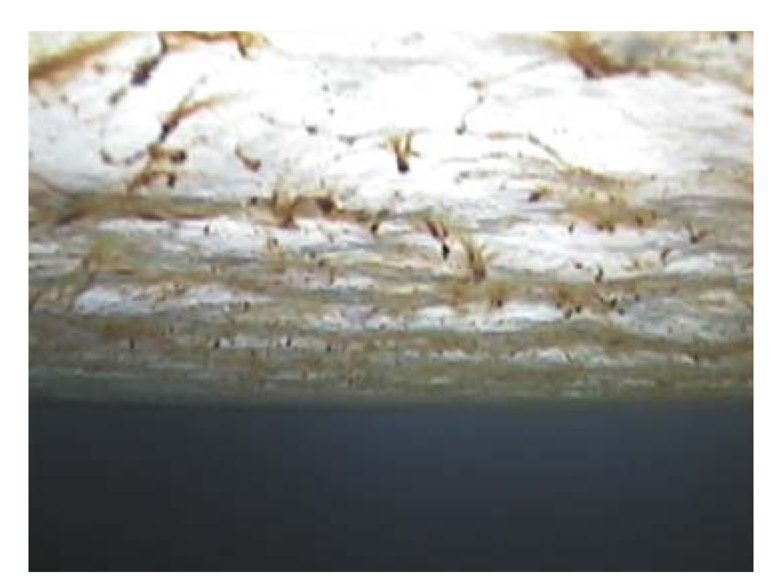
El hielo que hallamos en la naturaleza no forma un sólido homogéneo. Contiene burbujas y un sistema de canalículos microscópicos que portan agua líquida. En su seno, la salinidad es mayor que la del mar y pr ello se denominan "canales de salmuera". La alta salinidad mantiene el agua líquida, incluso a temperaturas inferiores a los 5 grados bajo cero.

Algas, bacterias, protozoos y otros microorganismos encuentran en esos refugios la protección que no les ofrece el agua libre. Muy angostas, tales cavidades sólo pueden acoger organismos microscópicos. Añádase que algunas algas sintetizan moléculas de alto peso molecular para evitar la congelación del agua; alteran incluso la estructura cristalina del hielo, transformándolo en un entorno más favorable. Las bacterias suelen ser de gran tamaño y filamentosas; degradan la materia orgánica a temperaturas muy bajas.

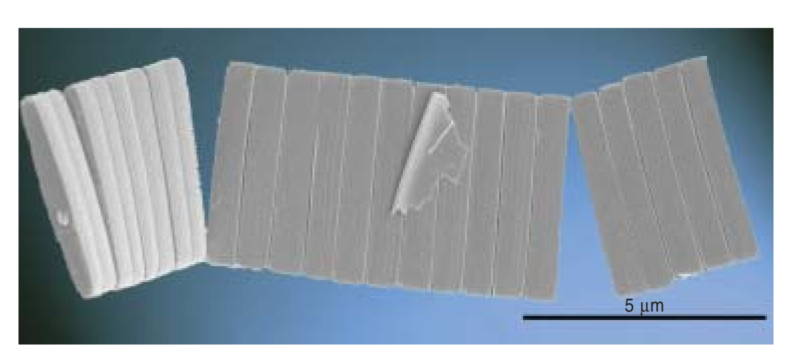
La cantidad de luz solar que llega al interior del hielo depende de diversos factores: de la irradiancia en el exterior, de la estructura del hielo y de la nieve que a menudo lo recubre. En los inviernos polares y en los ambientes alpinos, apenas llega luz a los canales. Con todo, sobrevivir a ese oscuro invierno conlleva, también, alguna ventaja: las algas que medran en los canalículos son siempre las primeras en recibir la luz del sol cuando empieza el deshielo, y gracias a los carotenos y otros pigmentos accesorios, pueden captar la poca luz de principios de primavera. De ahí su puesto de avanzadilla en cuanto despunta la estación. Su crecimiento en ese momento puede ser tan rápido, que a menudo se dividen en cadenas de células visibles en los canales del hielo.



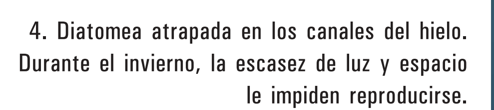
1. Corte transversal de una masa de hielo marino. Se aprecian canales y pequeñas cámaras de agua hipersalina donde viven microalgas y otros microorganismos.



2. Cadenas de diatomeas que crecen rápidamente debajo del hielo marino cuando llega la primavera austral. Debido a su gran tamaño, pueden llegar a confundirse con macroalgas.

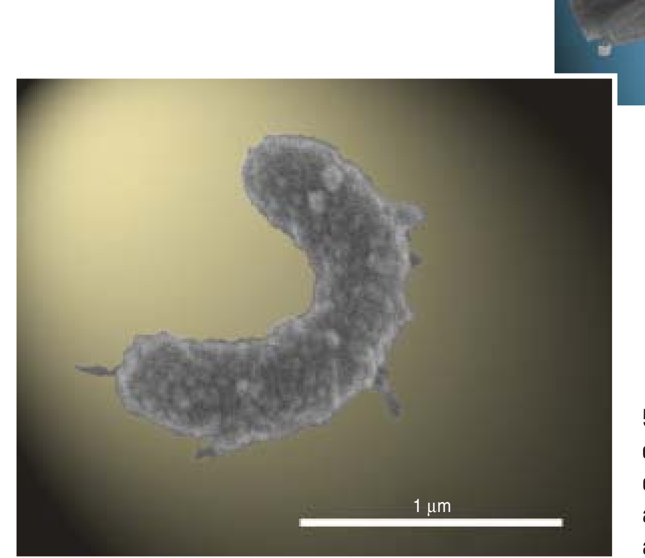



3. Cadena de diatomeas que ha comenzado a formarse al llegar la primavera merced al incremento de radiación lumínica, el deshielo y el acopio de reservas durante el invierno.



4. Diatomea atrapada en los canales del hielo. Durante el invierno, la escasez de luz y espacio le impiden reproducirse.

30 µm




5. Bacterias como ésta viven durante el invierno en los canales hipersalinos del hielo donde coexisten con una rica y variada comunidad microbiana, a pesar de las bajas temperaturas, que pueden llegar a los 20 grados bajo cero.

FOTOGRAFIA DE LA IZQUIERDA CEDIDA POR FERNANDO VALERO, AWI, BREMERHAVEN, ALEMANIA

# La brújula de Einstein

1. DE PIE SOBRE UNA PLATAFORMA GIRATORIA (o sobre la aguja de una brújula gigante) con un giroscopio en cada mano: gracias a un experimento mental de este tipo, Einstein y W. J. de Haas explicaron adecuadamente el magnetismo del hierro. Cuando los ejes de los giroscopios, que giran en sentido antihorario, apuntan hacia el exterior, sus momentos angulares opuestos suman cero (*centro*). Cuando los giroscopios apuntan hacia arriba, los momentos angulares se alinean y suman un valor no nulo. Como se conserva el momento angular total del sistema, la plataforma giratoria empieza a moverse para compensar el exceso de momento angular. De acuerdo con la teoría de Einstein-de Haas, revisada posteriormente, cuando un campo magnético externo alinea las órbitas que los electrones describen alrededor de los átomos de hierro de un imán, éste se pone a girar.

MATT COLLINS

El electromagnetismo de una barra imantada desvió la atención de Einstein mientras perfeccionaba la teoría de la relatividad general. ¿Por qué?

Peter Galison

A comienzos de 1915 Albert Einstein fue implicándose en la vida política. Primero protestó contra el militarismo que había arrastrado a Europa a una guerra devastadora. Ese año marcó asimismo un cambio significativo en su larga carrera científica. Se esforzaba por entonces, con la ayuda del matemático Marcel Grossman, en aprender lo más posible acerca de un nuevo tipo de geometría, hasta entonces desconocida casi por completo por los físicos, que podía resultarle útil para definir la curvatura del espaciotiempo. Las posibilidades le parecían inmensas: ¿se podría generalizar la relatividad especial y convertirla en una teoría de la gravedad? ¿Podría sustituirse el cosmos newtoniano, con sus fuerzas inversamente proporcionales a los cuadrados de las distancias, por un universo donde una ecuación de campo ligase la masa y la energía a un espaciotiempo curvado? En noviembre de 1915, tras la batalla intelectual más ardua de su vida, estuvo finalmente en condiciones de presentar al mundo la relatividad general. Su esfuerzo titánico había concluido con un triunfo de la teoría, la razón y la abstracción.

Sin embargo, buena parte de ese trascendente año no la pasó en las platónicas alturas de los tensores y las transformaciones de coordenadas, sino enfrascado en pegar fibras de cuarzo a espejos y enviar impulsos de corriente eléctrica a electroimanes. El 12 de febrero escribía a Michele Basso, su mejor amigo: "Acabaré pronto el experimento... Un magnífico experimento que siento no puedas ver. ¡Qué difícil se nos presenta la naturaleza cuando nos aproximamos experimentalmente a ella! A estas alturas de la vida, me ha entrado el gusto por la experimentación". La tarea que se propuso llevar a cabo con W. J. de Haas, el yerno de Hendrik Lorentz, se les había resistido a algunos de los experimentadores más avezados de todos los tiempos: sacar a luz el mecanismo que da lugar al magnetismo en el hierro.

La idea básica era muy sencilla. La corriente eléctrica que circula por una espira crea un electroimán. Einstein se planteó si la naturaleza magnética del hierro imantado no se debería a un fenómeno parecido, como ya habían imaginado mucho tiempo atrás André Marie Ampère y quienes siguieron sus pasos. Se preguntaba si, a nivel atómico o molecular, no existirían corrientes circulares, como las de las espiras, orientadas en una misma dirección. En ese caso, sólo existiría un tipo de magnetismo. Por esa época escribió:

Desde que [Hans Christian] Oersted descubrió que no sólo los imanes permanentes crean efectos magnéticos, sino también las corrientes eléctricas, dio la impresión de que eran dos los mecanismos, al parecer independientes, que generaban los campos magnéticos. Esta situación suscitó la necesidad de reducir ese par de causas de los campos magnéticos, en lo esencial distintas, a una sola. En este sentido, poco después del descubrimiento de Oersted, Ampère enunció su célebre hipótesis acerca de las corrientes moleculares, según la cual los fenómenos magnéticos se deben a corrientes de carga moleculares. ["Experimenteller Nachweis der Ampèreschen Molekularströme", Einstein y de Haas, *Deutsche Physikalische Gesellschaft*, vol. 17, pág. 152; 1915.]

Reducción de dos causas a una: Einstein quintaesenciado. El artículo en el que enunció la relatividad especial empezaba afirmando que la interpretación tradicional de las ecuaciones de James Clerk Maxwell era errónea, ya que parecía como si hubiera dos razones de que apareciese una corriente cuando una bobina y un imán se encuentran en movimiento relativo. La versión ordinaria sostenía que, si el imán se acercaba a una bobina quieta, se generaba en el entorno de aquél un campo eléctrico que impelía a las cargas del hilo a circular. Pero si se movía la bobina y el imán permanecía inmóvil, no se producía ningún campo eléctrico en el espacio que lo rodeaba; aun así, el progresivo aumento de la intensidad del campo magnético en la localización del conductor inducía en éste una fuerza electromotriz que impulsaba las cargas por las espiras. En cambio, la teoría especial de la relatividad explicaba ambos fenómenos de manera simétrica gracias a una reconsideración del significado del tiempo, el espacio y la simultaneidad.

Con su principio de equivalencia de 1907, Einstein había puesto en duda la idea, nunca objetada hasta entonces, de que existían dos tipos de masas: la gravitatoria (responsable del peso de una esfera de plomo) y la inercial (la resistencia de una masa, digamos también que una esfera de plomo, a la aceleración, incluso en el espacio exterior, lejos de cualquier astro). Einstein afirmó, en cambio, que existía un único tipo de masa: no había posibilidad alguna de distinguir entre lo que le sucede a una masa presionada contra el fondo de un cohete espacial que se acelera y a una masa a la que un campo gravitatorio mantiene contra el suelo de una habitación inmóvil.

Análogamente, Einstein creía firmemente en la existencia de un único tipo de magnetismo, originado, según él, por la alineación de pequeños imanes, en realidad las corrientes cerradas creadas por los electrones al girar alrededor de los núcleos atómicos. ¿Cómo se podía comprobar esta idea con un experimento?

Supongamos que nos situamos sobre una plataforma giratoria con un giroscopio en cada mano, de manera que sus ejes apunten hacia el exterior y giren en sentido horario, según nuestro punto de vista. Los momentos angulares de los giroscopios se orientarán en sentidos opuestos y, por lo tanto, se anularán entre sí; el momento angular total del sistema valdrá cero.




2. UN BUSCADOR GIROSCOPICO DE LA DIRECCION, suspendido de forma que pueda girar en cualquier dirección, continuará apuntando hacia el mismo punto del cielo pese a la rotación y la translación de la Tierra. Sin embargo, situado a una latitud distinta de la de los polos, el giroscopio se separará del plano paralelo al suelo debido a la rotación de la Tierra y dejará de ser útil para la navegación.

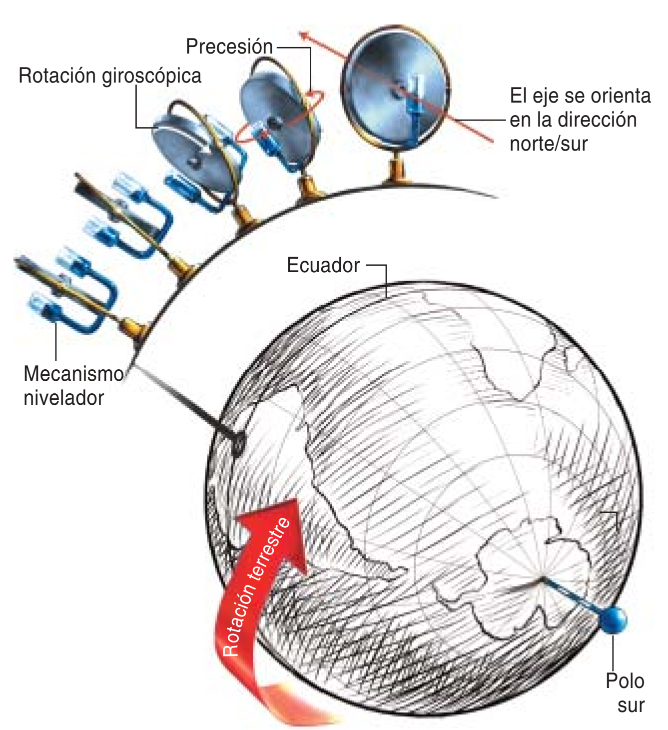
A continuación, levantemos ambas manos hasta situarlas sobre la cabeza. Los giroscopios apuntarán ahora hacia arriba. Sus momentos angulares tendrán el mismo sentido y sumarán un valor no nulo. Sin embargo, como el momento angular de un sistema cerrado se conserva, empezaremos a girar; así se contrarrestará el momento angular de los giroscopios.

Einstein imaginó una situación análoga pero en miniatura, en el interior de un imán. Supongamos que disponemos de un cilindro de hierro no imantado suspendido de una fibra delgada y flexible (*véase la figura 4*). De repente, se aplica un fuerte campo magnético, lo suficientemente intenso como para orientar todas las pequeñas órbitas electrónicas y, por lo tanto, imantar el cilindro. Según Einstein, en esta situación muchas de las pequeñas órbitas electrónicas orientadas al azar quedarían alineadas y sus momentos angulares no se anularían entre sí, sino que se sumarían. También aquí, como en el caso de la plataforma giratoria, el cilindro empezaría a girar para compensar el momento angular resultante. En esto consistía la idea básica del experimento. Sorprendentemente, Einstein y De Haas consiguieron resultados significativos pese a lo delicado que era el aparato que construyeron. Pero, ¿de dónde procedía la idea y por qué se planteó en 1915, en medio de una guerra horrible y justo cuando Einstein intentaba formular la relatividad general?

Para obtener una respuesta hay que remitirse al período inmediatamente posterior a la graduación de Einstein en el Politécnico de Zúrich en 1900. Einstein tuvo dificultades para acceder a un puesto de trabajo remunerado. Las cartas de rechazo de su solicitud se amontonaron sobre su mesa hasta mediados de 1902. Recibió entonces una propuesta de trabajo de la Oficina de Patentes de Berna. Aunque Einstein se había enfrentado con todos y cada uno de los profesores en sus años de estudiante, sentiría admiración por el responsable de la Oficina, Friedrich Haller, de quien aprendería mucho. Einstein haría suya la actitud de Haller: "mantenerse críticamente alerta", tomar con escepticismo los planteamientos de los inventores.

Einstein sentía pasión por las máquinas y se carteaba con otros entusiastas. Incluso llegó a construir algunas en su apartamento. A lo largo de los años patentó neveras, inventó nuevos instrumentos para medir la electricidad y asesoró a sus amigos sobre todo tipo de aparatos. Su padre y su tío comerciaban con maquinaria y habían patentado algunas de su invención. Por desgracia para nosotros, las evaluaciones de Einstein de las solicitudes de patentes fueron destruidas, por imperativo legal, excepto en algunos casos: aquellas que fueron objeto de un expediente judicial. Se convirtió muy pronto en una de las autoridades técnicas más estimadas de la Oficina de Patentes; de ahí que se le apreciara también como perito en los juicios.

Esta actividad explica su fascinación por el magnetismo. A comienzos del siglo XX, la fiel brújula empe-




3. LAS BRUJULAS GIROSCOPICAS utilizan fuerzas generadas por la rotación de la Tierra. Sirven para localizar el norte desde cualquier posición sobre la superficie terrestre. El diseño original de Anschütz-Kaempfe llevaba pesos para que la gravedad lo mantuviese nivelado. A medida que gira el planeta, el eje del giroscopio va virando con la superficie terrestre. Como el giroscopio intenta mantener su nivel, se produce un efecto de precesión, que gira su eje hasta que forma un ángulo recto con la fuerza aplicada. Este fenómeno se asemeja al que se observa en una peonza, cuya parte superior oscila a medida que se va frenando el movimiento. La precesión provocará finalmente que el eje apunte hacia el norte (*imágenes de izquierda a derecha*).



zó a dar problemas. No funcionaba bien en los buques modernos, cada vez con más partes metálicas y aparatos eléctricos, fallaba en los submarinos o cerca de los polos terrestres. También resultaba problemática para la aviación, ya que su indicador direccional no respondía bien cuando los aeroplanos viraban.

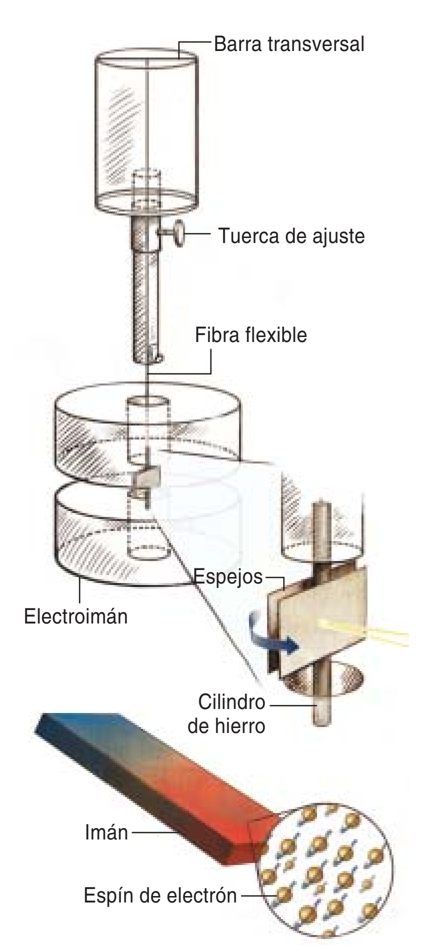
Dos empresas se interesaron por el problema de la brújula: dirigía una de ellas el inventor e industrial norteamericano Elmer A. Sperry; la otra, su rival alemán Hermann Hubertus Maria Anschütz-Kaempfe. La solución consistió en convertir los giroscopios en brújulas. Con ingenio, Anschütz-Kaempfe fabricó el armazón de su giroscopio de forma que la orientación de su eje sufriese un lento movimiento cíclico —un movimiento de *precesión*—, por el que acababa alineándose con el eje de la rotación terrestre (*véanse las figuras 2 y 3*). Poco después, Sperry construyó un instrumento parecido. Anschütz-Kaempfe no tardó mucho en presentar una demanda por violación de patente. Sperry respondió como suele ser habitual: alegó que la idea en sí era ya vieja.

A mediados de 1915 Einstein compareció en el caso como experto. En su declaración mostró que los giroscopios anteriores, dotados de suspensiones de cardán, no podían utilizarse como brújulas, puesto que sólo podían moverse un poco dentro de su armazón; el menor balanceo de un barco los volvía inservibles. Anschütz-Kaempfe ganó el caso. Einstein se convirtió en una autoridad en giróscopos, hasta el punto de que durante decenas de años percibiría derechos por sus informes.

Sin embargo, los beneficios que le reportaron en el campo de la física fueron mucho mayores: “Llegué a demostrar la naturaleza del átomo paramagnético gracias a los informes técnicos que redacté sobre la brújula giromagnética” [Einstein a E. Meyerson, 27 de enero de 1930, Einstein Archives Online]. Se dio cuenta de que, al igual que la rotación de la Tierra orienta una brújula giroscópica, disponer en una misma dirección los giróscopos atómicos de un cilindro de hierro haría que éste girara. El experimento tuvo un éxito espectacular (*véase la figura 4*). Einstein y De Haas demostraron así un efecto tan sutil, que ni siquiera el gran James Clerk Maxwell lo había advertido.

Pero la historia no acaba aquí. Aunque el experimento concordaba muy bien con la teoría que decía que el origen del magnetismo se encontraba en los electrones que orbitaban alrededor de los núcleos atómicos, se atacaron los resultados, primero con cierta cautela, luego de forma insistente. Las mediciones de Einstein y De Haas del magnetismo por unidad de momento angular parecían desviarse en un factor dos, anomalía que nadie consiguió explicar adecuadamente hasta mucho tiempo después, cuando se desarrolló la mecánica cuántica y se estableció el concepto de espín electrónico. La aceptación de un modelo teórico concreto por parte de Einstein le rindió un doble beneficio. Por un lado, le había inspirado el planteamiento de su experimento; en particular, dónde debía buscar el efecto. Maxwell y otros físicos anteriores no habían sabido estimar su magnitud y lo pasaron por alto. Por otro lado, al haber escogido Einstein un modelo teórico y calcular con él un resultado, que el efectivamente obtenido coincidiese con ése predicho hacía más aceptable el experimento en sí; perdía así peso el que hubiese muchos factores de los que cabía pensar, en principio, que podrían haber distorsionado los datos, como el efecto del campo magnético terrestre y las posibles fluctuaciones del aparato.

Esta historia me trae a la cabeza uno de los magníficos dichos de Einstein: “Sólo se cree una teoría el científico que la ha concebido; en cambio, menos el propio experimentador, todos tienen fe en un resultado experimental”.




4. CON ESTE APARATO EXPERIMENTAL Einstein y De Haas demostraron su teoría sobre el magnetismo del hierro. Aplicaron un intenso campo magnético a un cilindro de hierro no imantado y suspendido de una fibra flexible. Según su teoría, el cilindro giraría, ya que el campo alinearía las órbitas de los electrones que contuviese. Los espejos adosados, que reflejaban un haz luminoso a medida que rotaba el cilindro, confirmaron la teoría. Más tarde se comprobó que la causa del magnetismo del hierro es el espín (la rotación de los electrones sobre sí mismos) y no las órbitas electrónicas. Una barra de hierro queda imantada cuando los espines de sus electrones se alinean.

MATT COLLINS

## El autor

**Peter Galison** es profesor Mallinckrodt de historia de la ciencia y física en la Universidad de Harvard. Ha sido galardonado con el premio Max Planck (1999).

## Bibliografía complementaria

La obra de Galison *How Experiments End* (University of Chicago Press, 1987) es un estudio detallado de los trabajos experimentales de Einstein.

# Einstein y los comienzos de la física cuántica: de la osadía al desencanto

Einstein consideró *revolucionarias* algunas de sus ideas sobre la física cuántica. Un calificativo que no empleó en ninguna otra ocasión; ni siquiera al referirse a su teoría de la relatividad. Pero su osadía no le condujo al éxito pleno, sino al desencanto final

Luis Navarro Veguillas

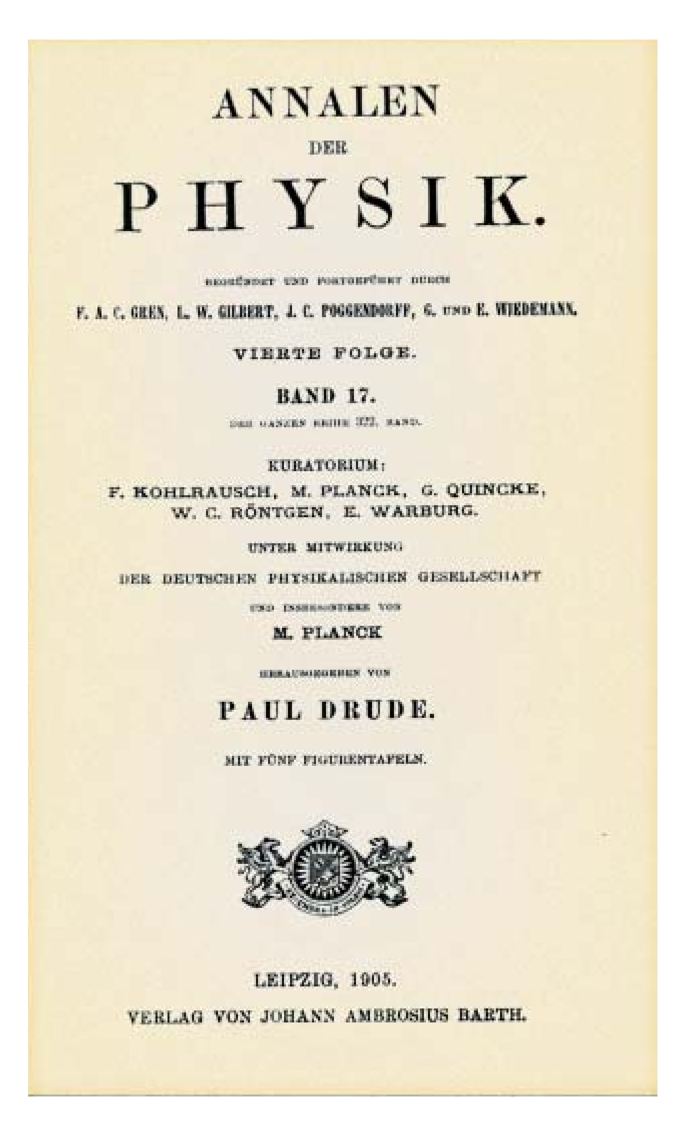
Si se realizase una amplia encuesta acerca de cuáles han sido las grandes aportaciones de Albert Einstein (1879-1955) a la física, es seguro que su archifamosa teoría de la relatividad sería con mucho la más citada. También es posible que en buena parte de las respuestas no se hiciera mención a ninguna otra de sus contribuciones. Por eso tal vez resulte sorprendente conocer esta opinión de Max Born, premio Nobel de Física de 1954: "Einstein habría sido uno de los más grandes físicos teóricos de todos los tiempos incluso si no hubiera escrito una sola línea sobre la teoría de la relatividad".

Aquí nos vamos a referir a las aportaciones del mito a un campo que cultivó con pasión y dedicación extrema a lo largo de medio siglo. Seguiremos la estela de su pensamiento acerca de las ideas que hicieron posible la aparición de la mecánica cuántica, la teoría que se ha mostrado como la adecuada para explicar el comportamiento de la naturaleza a nivel atómico. Einstein calificó de "revolucionaria" su contribución a este campo. Un calificativo que jamás empleó en relación con ninguna otra de sus originales ideas; ni siquiera al referirse a la relatividad.

Comenzaremos exponiendo el origen y el desarrollo de las primeras nociones cuánticas de Einstein, acerca de ciertas propiedades de la emisión y de la absorción de luz, en 1905. Seguiremos las oscilaciones de sus ideas, y de las polémicas que suscitaron, prestando atención especial al nacimiento del *fotón* en 1916 como constituyente elemental de la radiación. Y comprobaremos que ni el que se le concediera el Premio Nobel de Física de 1921 —por su explicación cuántica del efecto fotoeléctrico— sirvió para acallar las voces de los que clamaban contra sus revolucionarias concepciones sobre la luz y la radiación electromagnética.

Forzoso será referirse a las circunstancias últimas que le llevaron, tras veinte años de intensa dedicación, a inclinarse por la automarginación. El papel que en la nueva teoría cuántica se asignaba a la probabilidad nunca pudo ser asimilado por Einstein, quien actuó de forma coherente con lo que —un tanto dramáticamente— había expresado por carta al matrimonio Born a mediados de 1924, ya en la antesala de la aparición de las respectivas formulaciones de Werner Heisenberg (1925) y de Erwin Schrödinger (1926): "Me resulta intolerable la idea de que un electrón expuesto a la radiación pueda escoger a su antojo el momento y la dirección del salto. Si así resultara, finalmente preferiría haber sido un zapatero remendón, o incluso empleado de casino, antes que físico".

*SCIENTIFIC AMERICAN*, JUNIO DE 1939; ELIZABETH MENZIES (*fotografía*), CORTESIA DE G. GOSEN RARE BOOKS



ANNALEN

DER

PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH

F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

DER GANZEN REIHE 322. BAND.

KURATORIUM:

F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE,

W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG

DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

UND INSBESONDERE VON

M. PLANCK

HERAUSGEGEBEN VON

PAUL DRUDE.

MIT FÜNF FIGURENTAFELN.

LEIPZIG, 1905.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

1. Portada del volumen 17, correspondiente a parte del año 1905, de la prestigiosa revista *Annalen der Physik*. En este tomo aparecieron los tres famosos artículos de Einstein sobre los *quanta*, el movimiento browniano y la teoría de la relatividad especial.

La vigente mecánica cuántica afirma, siguiendo con la metáfora anterior, que el electrón efectivamente salta a su antojo o, al menos, nosotros nunca seremos capaces de anticipar cuándo y cómo saltará. La nueva teoría sólo proporciona información estadística del fenómeno. Para Einstein, la consagración de este tipo de *indeterminismo* representó el mayor varapalo de su vida científica. Nuestro análisis de sus aportaciones en el contexto que se produjeron no sólo se debe entender como un homenaje en la conmemoración del centenario de su *annus mirabilis*, sino que constituye una buena ilustración sobre las complejidades de la creación científica. Este artículo no es sino una pequeña muestra de la ardua y prolongada batalla, incluyendo victorias y derrotas, que Einstein libró en su empeño por desentrañar el misterio de los *quanta*, y que él mismo sintetizó, tal vez con excesivo e injustificado pesimismo, con estas palabras:

“Un total de cincuenta años de especulación consciente no me ha acercado a la solución de la cuestión: ¿qué son los *quanta* de luz? Es cierto que hoy día cualquier pillo cree saber la respuesta, pero se equivoca.” [Carta de Einstein a Michele Besso, 12 diciembre, 1951]

## Berna, la ciudad de los milagros

Con veinticuatro años y un trabajo cómodo en la Oficina Suiza de Patentes de Berna, Einstein rezuma felicidad. Acaba de casarse con Mileva Marić, compañera de estudios universitarios en el famoso *Eidgenössische Technische Hochschule* de Zúrich, más conocido por sus siglas ETH, y todo eran buenas perspectivas. En una carta a su eterno y fiel amigo Michele Besso escribe: “Ahora soy un hombre casado y llevo una vida muy agradable junto a mi esposa. Ella se ocupa perfectamente de todo, cocina bien y siempre está alegre”.

Había nacido en Ulm —sur de Alemania— en 1879, en el seno de una familia que le instruyó en los principios del judaísmo de forma harto liberal. Cursó sus primeros estudios en Múnich, de donde marchó a Pavía en 1895, un año antes de acabar la educación secundaria, para reunirse con sus padres, que se habían trasladado a Italia por razones laborales. Ese mismo año viajó a Zúrich para realizar un examen de ingreso en el ETH, pues no podía ser admitido directamente al no haber terminado los estudios secundarios, ni tener dieciocho años cumplidos. A pesar de su buena actuación en matemáticas y física, sus resultados globales no le permitieron lograr el acceso directo, por lo que se le recomendó matricularse en la Escuela Cantonal de Aargau —en Aarau, cantón de Aargau, Suiza— y cursar las enseñanzas que le faltaban para acabar la secundaria.

Así lo hizo, y en octubre de 1896 fue admitido en el ETH para cursar un ciclo de cuatro años que facultaba esencialmente para la docencia en matemáticas y en física en la enseñanza secundaria, por lo que Einstein fijó su residencia en Zúrich. Allí se habría de encontrar con tres personajes que —en un momento u otro— ejercerían una decisiva influencia sobre él: sus compañeros de estudios Marcel Grossman y Mileva Marić, y Michele A. Besso, un ingeniero suizo que luego sería su más fiel amigo de por vida.

Poco se sabe aún hoy de Mileva Marić. Era cuatro años mayor que Einstein. Hija de un alto funcionario húngaro, ella había nacido en Titel —entonces en el sur de Hungría, hoy en Serbia—, y en su adolescencia adquirió tan alta formación como para poder aspirar a cursar estudios en el prestigioso ETH, donde era la única mujer de su curso. Allí se estableció una relación sentimental entre Einstein y Marić. Albert obtuvo el título en 1900, con calificaciones muy justas: las más bajas entre los cuatro aprobados. De los once estudiantes que habían comenzado sólo cinco llegaron al examen final, en el que Mileva fue suspendida. No obstante las calificaciones de ambos fueron muy similares. Tan sólo en “Teoría de funciones” fueron cla-

ramente diferentes: 11 sobre 12 para él y 5 sobre 12 para ella, lo que en definitiva fue causante del suspenso de la joven.

Marić lo volvió a intentar un año después y volvió a suspender, a pesar de la ayuda de Einstein quien, a su vez, fracasó en su intento por obtener una plaza de ayudante en el mismo ETH de Zúrich, por lo que se vio en la necesidad de recurrir a la docencia particular. Acabó por instalarse en Berna donde, a mediados de 1902, gracias a los buenos oficios del padre de su compañero de estudios Grossman, consiguió un puesto de trabajo como técnico de tercera clase en la Oficina de Patentes Suiza.

Poco antes de viajar a Berna, Einstein recibió una carta de Marić desde la casa de sus padres, en la actual Serbia, informándole del nacimiento de Lieserl, una hija de ambos de la que hasta hace poco no se conocía su existencia y que, a la vista de la total falta de información posterior a su nacimiento, debió de morir muy pronto o tal vez fuera dada en adopción ante las previsibles dificultades de una madre soltera en aquellos días.

En Berna encontró a Maurice Solovine, un joven filósofo rumano ávido de ideas sobre la física del momento, y a Konrad Habicht, un amigo de Zúrich que fue allá a ampliar sus estudios en matemáticas. Einstein se erigió en líder de la terna que bautizaron como Academia Olympia. Se reunían para discutir de filosofía, física y literatura. Aunque la Academia se disolvió tres años después, por la separación física de sus miembros, nunca se borró del recuerdo de Einstein. En su autobiografía rememoraba las lecturas y discusiones que allí hicieron —de Henri Poincaré, entre otros—, refiriéndose a "nuestra feliz Academia, que después de todo, resultaba menos infantil que las respetables que luego llegué a conocer de cerca".




2. El pintor e ilustrador Ben Shan dibujó este retrato para el artículo que Albert Einstein publicó en *Scientific American* en abril de 1950.

Quedaban lejos en su memoria, que no en el tiempo, los espesos años escolares, los frecuentes cambios de domicilio, la búsqueda de un empleo digno y las discusiones altisonantes con sus padres, especialmente con su madre, ante el opresivo interés que mostraban por evitar a toda costa la boda con Mileva. No tendría que oír más comentarios desagradables sobre la que ya era su esposa, que ciertamente no se ajustaba al modelo tradicional que sus padres creían que era el más adecuado para hacer feliz a Einstein. "...Ella es un libro como tú, y deberías tener una mujer... Cuando llegues a los treinta ella se habrá convertido en una vieja bruja (Mileva era, recordemos, cuatro años mayor que Albert)... Te hipotecas tu futuro y te cierras tu vida... Si tiene un hijo, bonito regalo para ti...". Son sólo algunas de las lindezas que su madre le había dedicado.

Ahora todo era distinto. Por si fuera poco, el año anterior le habían declarado exento del servicio militar por problemas físicos —pies planos, varices y excesiva sudoración— y se le había concedido la nacionalidad suiza, que ya no perdería jamás a pesar de todos los avatares de su vida. Se acabaron los cinco años que se mantuvo como apátrida desde que renunció, en 1896, a su nacionalidad alemana de nacimiento.

En Berna había llegado el momento. Además de examinar patentes, ahora podría abordar el análisis de ciertas cuestiones de física que le venían preocupando desde hacía tiempo y sobre las que tenía algunas ideas. Por ejemplo, desde muy niño había quedado seducido por el misterio que encierra el comportamiento de una brújula, siempre obligada a mirar hacia el norte guiada por una fuerza misteriosa. Y luego, ya próximo a comenzar sus estudios universitarios, se planteaba con frecuencia situaciones un tanto enigmáticas que las más de las veces acababan por remitirle a la necesidad de desvelar la auténtica naturaleza de la luz. Por ejemplo, uno de estos pensamientos recurrentes consistía en imaginarse lo que ocurriría si uno pudiera cabalgar a lomos de un rayo de luz: ¿Qué vería, si es que veía algo? ¿O tal vez la cuestión no estuviera del todo bien planteada?

Einstein partía de una posición aparentemente desfavorable. Su escasa relación con el mundo académico podía representar un factor negativo a la hora de abordar problemas de envergadura. Pero bien pudo suceder exactamente lo contrario: la osadía de su juventud y la falta de ligaduras con autoridades que tuvieran que dar alguna clase de beneplácito a su trabajo tal vez hicieran más fácil que la inteligencia y la imaginación se desarrollaran con plenitud. Tampoco hay que dejar de lado los beneficios —reconocidos más tarde por el propio Einstein— que para su formación le reportaba su trabajo como analista de las

3. Primera página del artículo de Einstein sobre los *quanta* de energía, en 1905. Una de las tres aplicaciones incluidas corresponde al efecto fotoeléctrico. Precisamente Einstein recibió el Premio Nobel de Física de 1921 "por sus servicios a la física teórica, y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico".

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderabeln Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderabeln Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

solicitudes de patentes, que le obligaba a una relación permanente con el mundo de los inventos y de la experimentación.

## Los *quanta* de Einstein: primeras andaduras hacia el Premio Nobel

Entre 1902 y 1904 Einstein publicó tres artículos en los que exponía una formulación genuina de la mecánica estadística, en la línea de Ludwig Boltzmann, distinta e independiente de la presentada por Jossiah W. Gibbs en 1902, desconocida por entonces para el joven Albert. En el tercero se interrogaba sobre las posibilidades de encontrar un sistema físico adecuado para contrastar las previsiones teóricas de sus métodos estadísticos con los resultados experimentales.

Un sutil razonamiento permite a Einstein dar con el sistema buscado: la radiación emitida por un "cuerpo negro" en equilibrio a una cierta temperatura. Recordemos que el cuerpo negro absorbe toda la radiación que le llega; precisamente su nombre le viene de que, al ser nula la reflexión, no ha lugar para distinguir colores por este procedimiento. Además, para mantenerse a temperatura constante, ha de emitir la misma energía que absorbe. Así fue cómo Einstein se vio inmerso en el análisis de la naturaleza y de las propiedades de la emisión y absorción de luz por un cuerpo negro.

Hasta 1899, los datos experimentales obtenidos al respecto eran acordes con la *ley de Wien*, propuesta tres años antes. Pero en el otoño de 1900, los experimentos realizados por Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum en Berlín con longitudes de ondas un tanto más largas que las empleadas hasta entonces pusieron de manifiesto que esa concordancia no era tal, confirmando sospechas previas de Otto Lummer y Ernst Pringsheim, entre otros. En unos días Max Planck encontró una nueva fórmula que encajaba con todos los resultados experimentales obtenidos hasta la fecha. En la sesión del 19 de octubre la nueva *ley de Planck* fue presentada ante los miembros de la Sociedad Alemana de Física. Y sólo unas semanas después —el 14 de diciembre de 1900— su autor leyó en el mismo escenario una memoria titulada "Sobre la teoría de la ley de la distribución de la energía en el espectro normal", en la que ofrecía la primera justificación teórica de aquella ley.

A tal fin Planck comenzó por idear un modelo que le permitiera alguna forma de actuación en el mundo de las por entonces incomprendidas relaciones entre la materia ordinaria y la radiación electromagnética. El cuerpo que emitía o absorbía radiación se asimilaba a un conjunto de partículas cargadas eléctricamente en permanente oscilación, a las que se responsabilizaba de la emisión y absorción de la radiación. El tratamiento clásico de estos osciladores no conducía a la *ley de Planck*, por lo que éste tuvo que buscar alternativas que permitieran obtener "a toda costa" la explicación teórica buscada.

Es así como Planck, "en un acto de desesperación", decidió aplicar los métodos estadísticos de Boltzmann al problema de la radiación. Unos métodos que no eran en absoluto de su devoción, pues implicaban el carácter probabilístico de las leyes de la termodinámica, contra su adhesión general al carácter absoluto de todas las leyes de la física. Por si fuera poco, aquella justificación teórica conducía inexorablemente a una extraña conclusión: los osciladores planckianos de frecuencia $\upsilon$ no podían absorber y emitir cualquier cantidad de energía, como cabía esperar según los tratamientos clásicos, sino sólo cantidades múltiplo de una unidad elemental —o *quantum*— de valor $\varepsilon = h\upsilon$, donde $h$ representaba una nueva constante universal, que más tarde sería bautizada como "constante de Planck".

En este contexto Einstein publica en 1905 un artículo titulado "Sobre un punto de vista heurístico referente a la emisión y transformación de la luz". El diccionario de la Real Academia Española define el término "heurístico", en una de sus acepciones, así: "En algunas ciencias, manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como



4. Los *quanta*, que en 1905 permitieron a Einstein explicar el efecto fotoeléctrico, alcanzaron su mayoría de edad en 1916 al convertirse en fotones. Una propiedad de la emisión de éstos por átomos, en un proceso estimulado por la presencia de otros fotones, constituye el fundamento teórico del láser. En la figura el primer láser de rubí adquirido en Barcelona (1962), que se encuentra en el laboratorio de óptica de la Universidad de Barcelona. Es muy parecido al primer láser de rubí, que fue construido por Theodore H. Maiman en 1960, en el laboratorio Hughes de Malibu, California.

UNIVERSIDAD DE BARCELONA, DPTO. DE OPTICA

por tanteo, reglas empíricas, etc.". Y, en efecto, Einstein no procedió aquí de forma rigurosa, aunque desplegó su imaginación en una dirección con cierta tradición en la historia de la física: el empleo ingenioso de ciertas analogías. Tras criticar algunas incoherencias detectadas por él en la contribución de Planck, Einstein llega a unas originales ideas que anticipa de forma clara ya en la introducción de su trabajo:

"Ciertamente, me parece que las observaciones asociadas a la 'radiación negra', la fotoluminiscencia, la producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros grupos de fenómenos relacionados con la producción o la transformación de la luz pueden entenderse mejor si se supone que la energía de la luz está distribuida discontinuamente en el espacio. De acuerdo con la hipótesis que vamos a admitir en este trabajo, cuando un rayo de luz emerge desde un punto, la energía no está continuamente distribuida sobre un espacio cada vez mayor, sino que consiste en un número finito de *quanta* de energía que están localizados en puntos del espacio, que se mueven sin dividirse, y que sólo pueden ser absorbidos o producidos como un todo".

La línea del razonamiento de Einstein fue la siguiente. En primer lugar obtuvo la variación de la entropía de un gas ideal como consecuencia de una transformación reversible de su volumen, manteniendo constante la temperatura. Después repitió el cálculo para el mismo proceso, pero ahora con radiación en lugar de gas, y suponiendo válida la *ley de Wien*, antes mencionada. La analogía formal entre ambos problemas y la comparación entre los respectivos resultados permitió a Einstein llegar a una conclusión trascendente:

"La radiación monocromática de baja densidad (dentro del rango de validez de la fórmula de Wien) se comporta desde el punto de vista de la teoría del calor como si estuviese constituida por *quanta* de energía, independientes unos de otros, de magnitud $h\nu$ [en notación actual]".

Así, este resultado fundamental de Einstein descansaba sobre la existencia de una analogía formal entre el gas integrado por moléculas y la radiación negra. Desde un punto de vista metodológico, tal proceder no podía esgrimirse como garantía sólida para la validez de un resultado que, por si fuera poco, se había obtenido a partir de la *ley de Wien*, un tanto obsoleta ya para la época, dada la mayor concordancia de la *ley de Planck* con los resultados experimentales.

El hecho de que en 1905 Einstein obtuviera la anterior cuantización a partir de la fenomenológica *ley de Wien*, y no de la más afinada de Planck, sorprenderá a quien asocie necesariamente la cuantización de la energía con la *ley de Planck,* algo que es usual en el "contexto de la justificación", en el que se enmarca la enseñanza de la física, pero que no se percibe en el "contexto del descubrimiento", que es el relevante para un historiador. Es sencillo comprobar que si Einstein hubiera empleado la ley más acorde con los experimentos del momento —la de Planck— no hubiese logrado exhibir la analogía sobre la que basó su resultado. No obstante, la cuantización de la energía va tan implícita en la *ley de Wien* como en la *ley de Planck*; lo demostró Paul Ehrenfest en 1911, si bien casi todos los físicos de la época —como la mayoría de los actuales— pasaron por alto tan importante contribución para entender la auténtica naturaleza de la hipótesis cuántica.

Es frecuente referirse a este artículo de Einstein como el de "la explicación del efecto fotoeléctrico". Y es cierto que allí se proporciona por vez primera una explicación completa y sencilla de dicho efecto, fundamento último de las hoy habituales células fotoeléctricas. Pero desde esta perspectiva el análisis del artículo ofrece una gran sorpresa: no sólo porque la explicación del efecto fotoeléctrico no aparece como elemento motivador, sino porque tan sólo se trata de una de las tres aplicaciones que Einstein propone —junto con la regla de Stokes para la luminiscencia y la ionización de gases por luz ultravioleta— para mostrar consecuencias medibles de su hipótesis cuántica sobre la radiación electromagnética.

Finalmente una cuestión de matiz. Para Planck la hipótesis sobre los *quanta* era una condición suficiente para deducir la ley que gobernaba el comportamiento de la radiación electromagnética. Por el contrario, para Einstein, la existencia de los *quanta* no era una hipótesis, sino ¡un resultado! que se deducía del comportamiento experimental de la radiación siempre que se atribuyera cierta validez metodológica al uso de la analogía. Como más adelante veremos, puede

que esta diferencia entre el *quantum* suficiente de Planck y el *quantum* necesario de Einstein —un matiz esencial en nuestra opinión— tuviese mucho que ver con el diferente grado de aceptación de los respectivos tratamientos.

## Un "experimento mental" que transformó los *quanta* en *fotones*

Planck estaba convencido de que su hipótesis cuántica no se apartaba un ápice del terreno clásico. El que fuera entendida como una condición suficiente ayudó a que no se percibiera como algo completamente ajeno a la física clásica. Ciertamente se trataba de una extraña propiedad, pero que sólo afectaba a ciertos osciladores que formaban parte de un modelo teórico para estudiar la radiación. Que no fuese sino una mera condición suficiente dejaba siempre la puerta abierta para intentar obtener el mismo resultado —la *ley de Planck*— por algún camino menos problemático.

El resultado de Einstein, en cambio, parecía atentar contra la teoría del campo electromagnético, formulada hacía más de treinta años por James C. Maxwell, y que ya formaba parte del acervo de la física. La conclusión de Einstein en 1905 sobre el carácter discreto del intercambio de energía entre materia y radiación parecía sugerir, cuando menos, una revisión del electromagnetismo maxwelliano, que lleva implícito el carácter continuo de la propagación de la energía a través del espacio. Si se añade que Planck era por entonces un prestigioso líder de la física y Einstein sólo un principiante, no parece extraña la reacción ante la osadía del joven. La tónica del impacto se detecta en la presentación, muy elogiosa en su conjunto, que el propio Planck hizo de Einstein como nuevo miembro de la Academia Prusiana de Ciencias ¡en 1913!:

"En suma, puede decirse que de los grandes problemas en que es tan rica la física moderna, difícilmente exista uno al que Einstein no haya hecho una contribución notable. Que alguna vez errara el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis de los *quanta* de luz, no puede esgrimirse realmente demasiado en su contra, porque no es posible introducir ideas de verdad nuevas, ni aun en las ciencias más exactas, sin correr a veces algún riesgo."

Einstein no cejó. Su interés por desvelar la naturaleza de la radiación se manifestó en la publicación de una veintena de trabajos durante los diez años siguientes, con un doble objetivo. Por un lado era prioritario convencer, y convencerse, de la necesidad de admitir algún tipo de comportamiento discreto para la radiación. Un tema que, además de Ehrenfest (1911), también abordó con éxito Poincaré (1912). Einstein no se dio por satisfecho. Incluso admitiendo cierto comportamiento discreto para la radiación, faltaría algo básico: hacerlo compatible con el carácter continuo que el electromagnetismo asignaba a la radiación. Casi una misión imposible pues, para una gran mayoría, el comportamiento discreto —propio de partículas materiales— y el continuo —el de las ondas electromagnéticas— representaban aspectos mutuamente excluyentes.

Einstein no llegó a resolver ninguno de los dos problemas, al menos a su entera satisfacción, pero en ambos hizo notables progresos. En ello desempeñó un papel importante uno de sus famosos "experimentos mentales" —*Gedanken-Experimente*—: experimentos que no necesitaban ser efectivamente realizados para poder obtener conclusiones de gran calado a partir de su análisis. El experimento mental al que nos referimos mereció la atención de Einstein en diversas ocasiones a partir de 1909. Se trataba de analizar las propiedades de la traslación uniforme de un espejo, totalmente reflectante para una pequeña gama de frecuencias y transparente para el resto. Se movía en el interior de una cavidad con gas y radiación electromagnética; todo ello en equilibrio a una cierta temperatura.

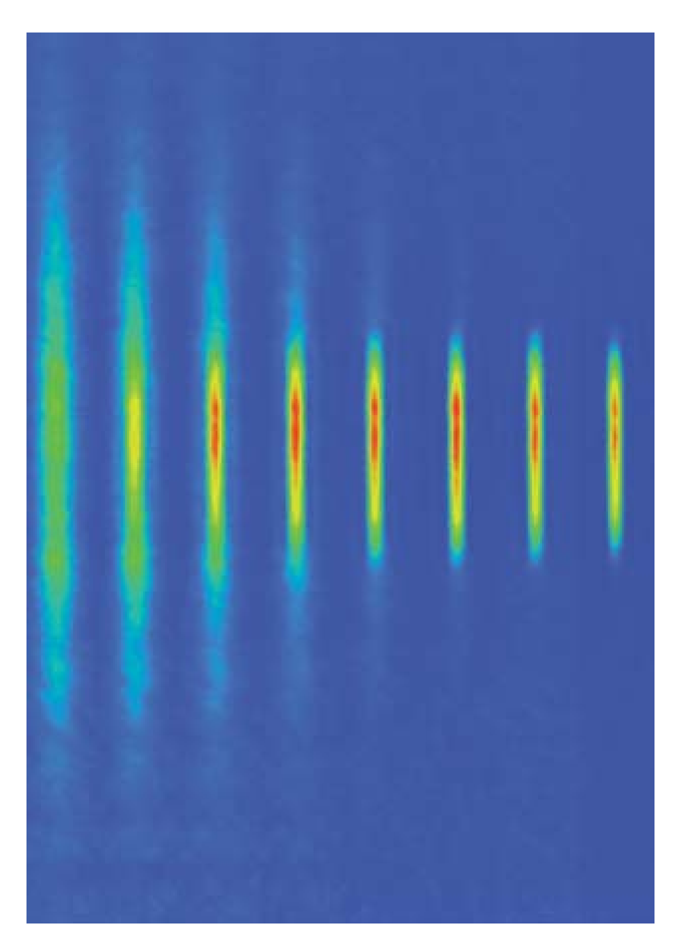
El análisis peculiar que Einstein hizo de este experimento mental no sólo le llevó a reafianzarse en su idea del *quantum* necesario, sino que le sugirió que la compatibilidad entre el discreto y el continuo —es decir, entre el aspecto corpuscular y el ondulatorio—,



5. Regresando de Japón, Einstein visitó Palestina y España en 1923. Aquí se le ve en el vestíbulo del Edificio del Reloj, de la Escuela Industrial de Barcelona.

en el caso de la radiación, tal vez no sólo fuera posible sino tan necesaria como la misma hipótesis cuántica. Hasta el punto de que en una de las reuniones anuales de los físicos alemanes (Salzburgo, 1909), Einstein presentó una contribución —que Wolfgang Pauli no dudó en calificar cuarenta años después como "uno de los hitos en el desarrollo de la física teórica"— en la que se atrevió a profetizar sobre los próximos desarrollos:

"Resulta innegable que existe un amplio conjunto de hechos referentes a la radiación que muestran que la luz tiene ciertas propiedades fundamentales que pueden ser entendidas mucho más apropiadamente a partir del punto de vista de la teoría newtoniana de la emisión [corpuscular] de la luz que desde el punto de vista de la teoría ondulatoria. Es mi opinión, por consiguiente, que *la próxima fase del desarrollo de la física teórica nos aportará una teoría de la luz que pueda interpretarse como una especie de fusión de las teorías ondulatoria y de emisión* [corpuscular] *de la luz*... Todo lo que yo quería era señalar brevemente que con su ayuda [la del experimento mental] *las dos propiedades estructurales (la ondulatoria y la cuántica*) desplegadas simultáneamente por la radiación de acuerdo con la fórmula de Planck *no deberían ser considerada mutuamente incompatibles*." [Los corchetes y la cursiva los hemos incluido nosotros]



6. En esta secuencia de imágenes, la mancha roja señala la aparición de una "gota" densa en una nube de gas ultraenfriada. Se trata de un condensado de Bose-Einstein: cientos de miles de átomos que, indistinguibles, comparten un mismo estado cuántico, el de menor energía. A la izquierda, la temperatura, 5 microkelvin, era un poco mayor que la necesaria para que se produjese esa unanimidad cuántica. Cuando, hacia el centro de la secuencia, bajó de los 2 microkelvin, fue constituyéndose el condensado, de sólo unos cientos de micrometros de envergadura. A medida que siguió bajando la temperatura, el condensado fue tomando toda la nube. Einstein, al aplicar a las moléculas de un gas el tratamiento que Bose había ideado para los fotones de la radiación electromagnética, predijo este estado de la materia en 1925. Sólo se plasmaría en el laboratorio setenta años después.

GRUPO DE WOLFGANG KETTERLE Y DAVE PRITCHARD, MIT

Fue otro tipo de análisis de ese mismo experimento mental el que en 1916 llevó a Einstein hasta la definitiva comprensión del carácter discreto de la radiación, una vez ya asentado en la física el modelo atómico de Bohr. Aplicando la navaja de Occam, Einstein eliminó todo vestigio de los osciladores planckianos para pasar a entender la materia como un agregado de moléculas que sólo pueden existir en un conjunto discreto de estados energéticos. Las transiciones entre éstos eran la causa de la emisión y absorción de radiación por la materia. Todo muy en la línea del modelo de Bohr.

La interacción materia-radiación se establecía en términos de tres procesos básicos: uno espontáneo en el que las moléculas emiten sin estímulo de la radiación exterior, y dos inducidos por la radiación. Estos últimos —a su vez, uno de emisión y otro de absorción— ocurren según una tasa que es directamente proporcional a la densidad de radiación presente, mientras que la emisión espontánea es independiente de la misma. Con tales premisas y la imposición de las condiciones precisas para que el sistema gas-radiación se encuentre en una situación de equilibrio térmico, Einstein logró deducir la *ley de Planck* y también que la unidad para el intercambio de energía entre la molécula y la radiación monocromática de frecuencia $\upsilon$ —intercambio de naturaleza discreta a causa del modelo atómico asumido— había de venir dada por el producto $h\upsilon$. La gran novedad radicaba en el proceso de emisión estimulada por la radiación, pues los otros dos procesos eran los que se consideraban en los tratamientos habituales. Y la clave estaba en que con sólo dos procesos —la absorción inducida por la radiación y la emisión espontánea— la imposición de la condición de equilibrio conducía a la ya muy obsoleta *ley de Wien*. Para la obtención de la *ley de Planck* se requería, además, la emisión estimulada.

Precisamente la emisión inducida de radiación por los átomos ofrece propiedades que habrían de constituir el fundamento teórico del moderno *láser*. Pero en este trabajo de 1916 aparecía otro resultado de máximo relieve. Analizando ciertas *fluctuaciones* en su experimento mental, Einstein llega a la conclusión de que el gas y la radiación no sólo intercambian energía sino también cantidad de movimiento, en una dirección determinada. Es el momento en que los viejos e impre-

cisos *quanta* de radiación, simples unidades de intercambio de energía, adquieren el status de auténticas partículas, más adelante llamadas *fotones*. La interacción materia-radiación pasa a explicarse en términos de intercambio de *fotones* y cada *fotón*, como cualquier partícula, tiene una energía y una cantidad de movimiento determinados.

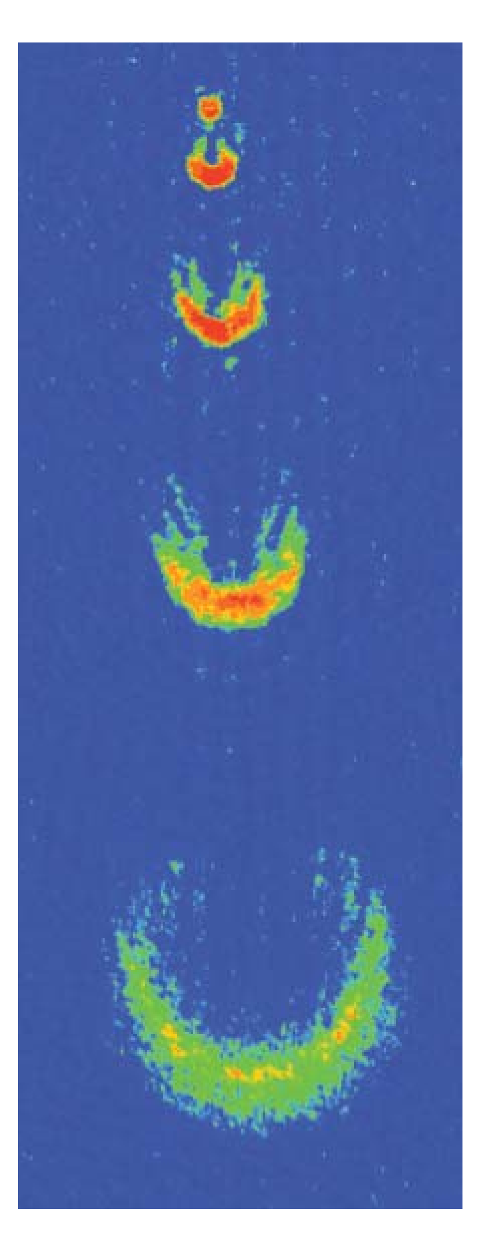
El impacto del *fotón* introducido por Einstein en 1916 no fue del todo positivo, por decirlo suavemente, pues parecía implicar la revisión de una teoría tan consolidada como era ya el electromagnetismo de Maxwell. La posición más extendida consistió en mantener la vigencia del electromagnetismo esperando que nuevas ideas acerca de la interacción materia-radiación permitieran prescindir del *fotón*, por superfluo; algo similar a lo que ya aconteció con el éter en 1905, cuando la teoría de la relatividad le hizo desaparecer del escenario de la física.

En 1923 se operó un cambio sustancial, como consecuencia de la explicación teórica del *efecto Compton* a partir de la aplicación conjunta de la teoría de la relatividad y de la teoría cuántica —dos teorías independientes y, por entonces, ambas controvertidas— al choque elástico entre un *fotón* y un electrón libre. (El efecto Compton consiste en el cambio de frecuencia de un fotón, en el rango de los rayos X, tras colisionar con un electrón atómico débilmente ligado.) Podría esperarse que desde ese momento el *fotón* habría quedado definitivamente instalado en la física, pero episodios posteriores permiten comprobar que la resistencia no desapareció del todo en esa fecha.

Por ejemplo, en 1924 Bohr, Kramers y Slater protagonizaron un curioso episodio para desterrar al *fotón*. Publicaron un trabajo en el que prescindían de él, aunque a costa de introducir propiedades tan extrañas en la interacción radiación-materia como la no conservación de la energía y de la cantidad de movimiento en los procesos elementales. Pero el artículo de Bohr, Kramers y Slater no logró acabar con el *fotón* pues, en 1925, Walther Bothe y Hans Geiger demostraron experimentalmente lo injustificado de ciertas predicciones de aquéllos y lo acertado de las basadas en el *fotón* de Einstein.

## Bose, Einstein y el nuevo método estadístico

En la primavera de 1924, Satyendranath Bose, un joven profesor bengalí, envió al ya famosísimo Einstein un trabajo redactado en inglés acompañado por una nota manuscrita:



7. El láser de átomos junta dos de los conceptos einsteinianos que se comentan en este artículo, la emisión estimulada y la condensación de Bose-Einstein. Un condensado [*parte de arriba*] está atrapado entre dos bobinas magnéticas. La aplicación de breves impulsos de un campo magnético oscilante altera las propiedades magnéticas de parte de esos átomos, de forma que quedan libres de la presa de las bobinas y se propagan, acelerados por la gravedad terrestre, como una onda de materia con propiedades de coherencia y brillo análogas a las de la luz de un láser; de ahí que se hable de "láser de átomos". Cada mancha en la secuencia vertical es un paquete de átomos. Cinco milisegundos median entre un paquete y el siguiente; se apilan a lo largo de 5 milímetros. La forma de media luna se debe a la gravedad y las fuerzas interatómicas.

GRUPO DE WOLFGANG KETTERLE Y DAVE PRITCHARD, MIT

"Respetado Señor:
Me he atrevido a enviarle el artículo adjunto para que usted lo examine y me dé su opinión. Estoy deseando saber qué piensa sobre él... Yo no sé suficiente alemán como para traducir el trabajo. Si usted cree que vale la pena publicarlo, le quedaría sumamente agradecido si tomara las medidas necesarias para su aparición en *Zeitschrift für Physik*. A pesar de ser por completo un extraño para usted, no tengo reparos en hacerle tal petición. Porque todos somos discípulos suyos aunque sólo nos hayamos podido beneficiar de sus enseñanzas a través de sus escritos. No sé si aún recuerda que alguien, desde Calcuta, pidió su autorización para traducir al inglés sus trabajos sobre relatividad. Usted accedió. El libro ya ha sido publicado. Yo fui el que tradujo su trabajo de relatividad general."

El trabajo llevaba por título "La ley de Planck y la hipótesis de los quanta de luz" y había sido rechazado por la prestigiosa *Philosophical Magazine*, a causa del informe negativo de un especialista. Por el contrario, Einstein debió de quedar impresionado por su contenido: en apenas una semana lo tradujo al alemán y lo recomendó para su urgente publicación en *Zeitschrift für Physik*, donde apareció con una nota del traductor en la que Einstein destacaba el interés del trabajo y anticipaba que él mismo elaboraría en breve una teo-

ría cuántica de los gases ideales aplicando el método introducido por Bose.

Prescindiendo aquí del contenido del artículo cabe preguntarse dónde radicaba la importancia que Einstein le asignaba. La respuesta es clara: por primera vez la fórmula de Planck se deducía a partir de un tratamiento exclusivamente corpuscular de la radiación, sin tener que recurrir para nada al electromagnetismo. La radiación se trataba como si fuera un gas de moléculas, sólo que el papel de éstas parecían desempeñarlo ahora los *fotones*, auténticas partículas ya, según las conclusiones de Einstein en 1916.

Aunque con un lenguaje anacrónico, se podría decir que la idea de Bose consistió simplemente en tratar a los *fotones* como partículas *indistinguibles*, contra la tradicional *distinguibilidad* de las moléculas. A la hora de calcular el número de los posibles repartos distintos de *fotones* entre estados, Bose lo hacía como si, por ejemplo, se tratara de repartir monedas de un euro entre personas: las monedas son *indistinguibles* a estos efectos, pues sólo interesa la cantidad total asignada. Pero atendiendo a la mecánica estadística clásica de Boltzmann, habría que haber procedido como si, por ejemplo, se tratara de repartir entradas para diferentes espectáculos: las entradas son *distinguibles* porque hay que tener en cuenta el espectáculo concreto al que se refieren.

Bose no era un físico estadístico consolidado y nunca fue consciente de que su tratamiento representara la base de una nueva mecánica estadística, en la que las componentes últimas de un agregado gozasen de *indistinguibilidad*. Más tarde reconocería que "no tenía idea de que lo que había hecho era realmente novedoso" y que él "no era estadístico hasta el punto de saber que lo que había hecho era algo en verdad distinto de la estadística de Boltzmann". Se trata de un curioso episodio histórico que ilustra sobre la complejidad inherente al proceso de la creación científica, en la práctica tan alejado de las rígidas prescripciones del *método científico*.

Einstein, en cambio, era un físico estadístico consumado que inmediatamente percibió las implicaciones del trabajo de Bose. Si tratando a los *fotones* como *indistinguibles*, éste había obtenido una fórmula —la de Planck— de la teoría cuántica de la radiación, Einstein pensó en volver a la analogía que ya había explotado en 1905 entre gas y radiación, sólo que ahora en sentido contrario. Es así como logró elaborar la teoría cuántica de los gases, largamente anhelada como posible solución a problemas pendientes ligados con ciertos comportamientos termodinámicos a muy bajas temperaturas.

Con el trabajo de Bose (1924) sobre la radiación y su extensión natural por Einstein (1924-1925) al gas de moléculas, nace la mecánica estadística de Bose-Einstein, primera alternativa cuántica a la mecánica estadística clásica. Entre los nuevos resultados obtenidos, además de la resolución de ciertos problemas pendientes ligados con el comportamiento de algunos gases a bajas temperaturas, figuraba la predicción de un extraño fenómeno, más tarde bautizado como *condensación de Bose-Einstein*: por debajo de una cierta temperatura prescribía una acumulación extraordinaria de moléculas en el estado de menor energía posible. London responsabilizó en 1938 a este fenómeno del extraño comportamiento del helio a muy bajas temperaturas; ello fue oportunamente corroborado y desde entonces la *condensación de Bose-Einstein* está incluida dentro del posible comportamiento de algunos sistemas termodinámicos.

Permítasenos aquí una ligera digresión de carácter técnico. Pronto se reconoció que los sistemas para los que son válidas las conclusiones de la mecánica estadística de Bose-Einstein debían estar representados por *funciones de onda* con una cierta propiedad de *simetría*; las partículas que integran un sistema tal se llaman *bosones*, por razones obvias. En 1940 Pauli demostró que los *bosones* son partículas cuyo espín sólo puede adoptar valores enteros: 0, 1... Por el contrario, la mecánica estadística de Fermi-Dirac, enunciada en 1926, describe sistemas donde aquella propiedad es ahora de *antisimetría* (la función de onda del sistema cambia de signo al permutar dos partículas cualesquiera del agregado), las partículas se llaman *fermiones* y su espín ha de ser semientero: 1/2, 3/2,...

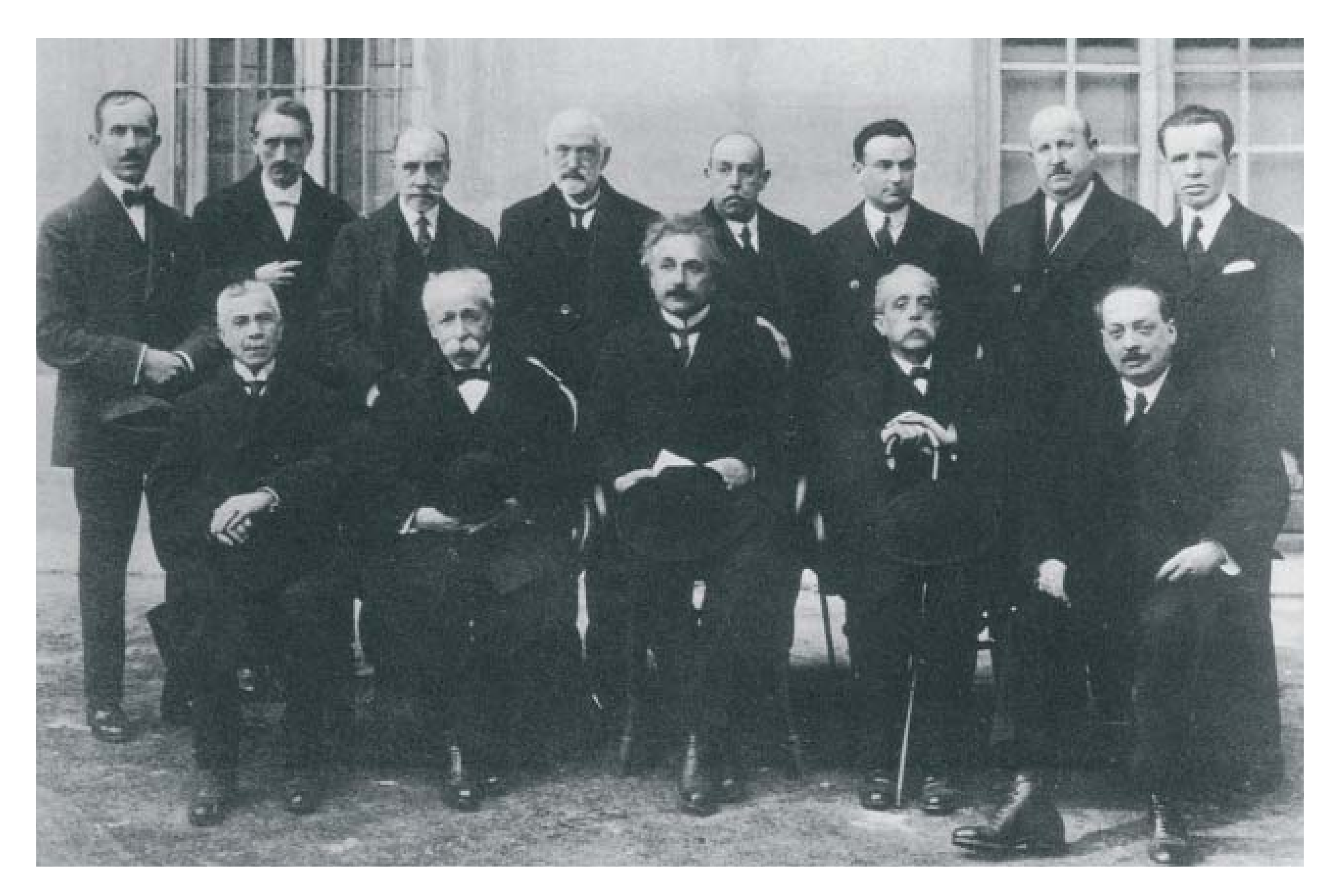
Pero retomemos el hilo del nuevo método estadístico, pues deparaba una sorpresa que ni Bose ni Einstein fueron los primeros en desvelar. Fue Ehrenfest quien detectó inmediatamente que, desde el punto de vista estadístico, aquéllos no habían actuado según los preceptos clásicos de Boltzmann, entre los que la *distinguibilidad* de las partículas ocupaba un lugar destacado. Einstein, sin ninguna justificación explícita, había tratado a las moléculas como *indistinguibles*, lo que en el fondo implicaba una nueva concepción estadística.

## Las misteriosas moléculas "ondulatorias"

Einstein no sólo reconoció, y aceptó, que su tratamiento se apartaba del marco clásico, sino que con unos sencillos cálculos comprobó que si hubiese tratado a las moléculas "a lo Boltzmann" no hubiese llegado a la teoría cuántica de los gases, sino que habría vuelto a obtener la vieja teoría clásica, con sus conocidos problemas. Y si Bose hubiese hecho otro tanto, tampoco habría llegado a obtener la *ley de Planck*, sino que se hubiese quedado en la *ley de Wien*, ya desterrada por su desajuste con los experimentos.

Ante tal situación parecía forzoso inclinarse ante el nuevo método estadístico, sobre todo si se tenía en cuenta otro resultado de Einstein: la mecánica estadística clásica —el antiguo método— resultaba ser una aproximación de la mecánica estadística cuántica —el nuevo método— cuando la temperatura del gas era suficientemente alta y la densidad del gas suficientemente baja; conste que estos dos criterios merecen mayor precisión de la que aquí podemos dedicarles. Einstein fue más lejos y se preguntó por aquellas características de las moléculas clásicas que hubieran podido quedar alteradas en virtud del nuevo tratamiento. ¡Y ahí llegó la gran sorpresa!

Con objeto de arrojar luz sobre la cuestión, como en tantas otras ocasiones, recurrió a otro de sus experimentos mentales: ahora estudió el comportamiento de



8. Esta fotografía (marzo de 1923) también corresponde a la visita de Einstein a España. Le rodean los catedráticos de la facultad de ciencias de la Universidad de Madrid.

dos gases iguales separados por una pared que sólo permitía el paso de moléculas con energía dentro de una cierta franja y que era impermeable para el resto. El análisis de la situación deparó una sorpresa que Einstein describió con estas palabras:

"De las consideraciones anteriores parece que, con cada movimiento [de una molécula], hay un campo ondulatorio asociado, de la misma forma que el campo ondulatorio óptico se asocia al movimiento de los *quanta* de luz. Este campo ondulatorio, cuya naturaleza física resulta por el momento oscura, debe en principio poder detectarse a través de los efectos de los movimientos correspondientes. Así, un haz de moléculas de gas que atraviesa una abertura deberá sufrir una difracción, análoga a la que experimenta un rayo luminoso. Para que un fenómeno de este tipo sea observable, su longitud de onda debe ser comparable a las dimensiones de la abertura."

Acabamos de ver cómo Einstein desembocó en la necesidad de asociar propiedades ondulatorias a las moléculas al buscar explicaciones de su comportamiento atendiendo al nuevo método estadístico. Estas ideas no eran simples "escapatorias" basadas en especulaciones formales. Como lo prueba el que, tras destacar que encajaban bien en el marco diseñado por Louis de Broglie en su tesis doctoral recién presentada sobre la *dualidad onda-corpúsculo*, Einstein incluyó sugerencias para detectar experimentalmente estas propiedades ondulatorias mediante la oportuna difracción de haces moleculares.

Así, las cuestiones planteadas hacia 1900 sobre la naturaleza y el comportamiento de la radiación, derivaron veinticinco años después hacia el estudio de unas misteriosas propiedades ondulatorias de las partículas materiales. En unos meses se dispararon los acontecimientos. Schrödinger tomó el testigo de Einstein y De Broglie, como él mismo reconoció, y formuló su *mecánica ondulatoria* a comienzos de 1926, proporcionando una base, según la opinión generalizada, para abordar de forma sistemática los problemas asociados con el comportamiento ondulatorio de la materia. Aunque el nuevo formalismo de Schrödinger también fue en principio bien recibido por Einstein, su actitud cambió drásticamente en unas semanas, tras la introducción por Born —a mediados de 1926— de la interpretación probabilística de la *función de onda*.

Hemos llegado al momento "elegido" por Einstein para desligar su nombre del desarrollo de la mecánica cuántica, aunque los primeros pasos de ésta siempre irán unidos a nuestro personaje. Ante los nuevos acontecimientos, el escepticismo de Einstein no cesó de aumentar; en especial tras la eliminación de todo vestigio de causalidad entendida al modo clásico: ahora ya no se podía certificar *a priori* que los experimentos realizados con dos átomos igualmente preparados condujeran a idénticos resultados. La descripción probabilística que la mecánica cuántica preconizaba como

explicación última fue el desencadenante de su paulatina pérdida de interés por los nuevos desarrollos. En una famosa carta a Born, de finales de 1926, Einstein explica así su posición:

"La mecánica cuántica es ciertamente impresionante. Pero una voz interior me dice que no constituye aún la última palabra. La teoría explica muchas cosas, pero realmente no nos acerca más al secreto de "el viejo" [*sic*]. Yo, en cualquier caso, estoy convencido de que *El* no juega a los dados."

## Epílogo: el desencanto final

La automarginación científica de Einstein fue acompañada de la social, a pesar del interés que no pocos tenían por mantenerle dentro del grupo que lideraba el desarrollo de la física cuántica. Un ejemplo de ello es la invitación que Lorentz, en su calidad de presidente del quinto congreso Solvay (Bruselas, 1927), le cursó para participar en el mismo. La contestación de Einstein, cuatro meses antes del comienzo, contiene sobrados elementos para detectar el desaliento que comenzaba a embargarle:

"Recuerdo haberme comprometido con usted a hacer un informe sobre estadística cuántica en el congreso Solvay. Después de mucha reflexión en torno al sí y al no, llegué al convencimiento de que no soy competente para hacer tal informe de una forma que realmente corresponda al estado de cosas [actual]. La razón está en que no he podido participar en el desarrollo moderno de la teoría cuántica tan intensamente como hubiera sido necesario para este propósito. Esto se debe, en parte, a que tengo muy escaso talento receptivo para seguir por completo los tormentosos desarrollos [recientes] y, en parte también, porque no apruebo la forma de pensar puramente estadística sobre la que están basadas las nuevas teorías... Le ruego no se disguste conmigo por ello; no lo tomé a la ligera, sino que probé con todas mis fuerzas".

En este quinto congreso Solvay (Bruselas, 1927) se exhibieron todas las grandes aportaciones a la teoría cuántica surgidas en los dos años anteriores. Allí se encontraban casi todos los protagonistas. Fue en esta reunión donde comenzó un largo y fructífero debate entre Einstein y Bohr, en torno a la interpretación del formalismo cuántico. Un debate entre dos posiciones irreconciliables: el "realismo" preconizado por Einstein, contra la "interpretación de Copenhague" —la ortodoxa— defendida por Bohr.

Einstein nunca dejó de buscar, aunque sin éxito, una nueva teoría acorde con sus premisas: algo así como una estructura fina de la mecánica cuántica en la que los fenómenos se describirían mediante unas *variables ocultas*, por el momento ajenas a nuestra percepción. Esta descripción sería independiente de nuestra forma de observación y gozaría del determinismo de la descripción causal de la física clásica. Los resultados que proporciona la mecánica cuántica serían algún tipo de promedio sobre aquellas variables; todo ello —las *variables ocultas* y la nueva teoría— pendientes de descubrir.

El desencanto de Einstein ante el cariz que tomaban los modernos desarrollos cuánticos no fue sólo testimonial, sino que se materializó en algunos trabajos, más críticos que constructivos. El más influyente es un artículo publicado en 1935 junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen —dos jóvenes colegas de Princeton— bajo el título "¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?", universalmente conocido por las siglas EPR. Su conclusión, tras la oportuna definición de lo que ellos entendían por "realidad física" y por teoría "completa", fue contundente: la respuesta al interrogante del título ha de ser negativa. Con la pronta respuesta de Bohr, comenzó una larga polémica sobre la interpretación del formalismo cuántico, en la línea apuntada durante las discusiones en el quinto congreso Solvay. Una debate aún en parte vigente, aunque no se plantee exactamente en los mismos términos.

Como testimonio de la posición última de Einstein, reproducimos unas frases, extraídas de su autobiografía científica, escrita en 1949 para conmemorar el septuagésimo aniversario de su nacimiento:

"Mi opinión es que la actual teoría cuántica, con ciertos conceptos básicos fijos que en esencia están tomados de la mecánica clásica, representa una formulación óptima de las conexiones [*sic*]. Creo, sin embargo, que esta teoría no ofrece un punto de partida útil para el futuro desarrollo. Este es el punto en el que mis expectativas difieren de las de la mayoría de los físicos contemporáneos... Ante todo creen que el carácter aparentemente discontinuo de los procesos elementales sólo puede representarse mediante una teoría en esencia estadística."

## El autor

**Luis Navarro Veguillas** es doctor en ciencias físicas y profesor titular de Historia de la Ciencia en la Universidad de Barcelona. Sus investigaciones historiográficas se dirigen hacia el análisis de la íntima relación existente entre el desarrollo de la mecánica estadística y la aparición de las primeras ideas cuánticas.

## Bibliografía complementaria

"EL SEÑOR ES SUTIL...". LA CIENCIA Y LA VIDA DE ALBERT EINSTEIN. Abraham Pais. Ariel, Methodos, 1984.

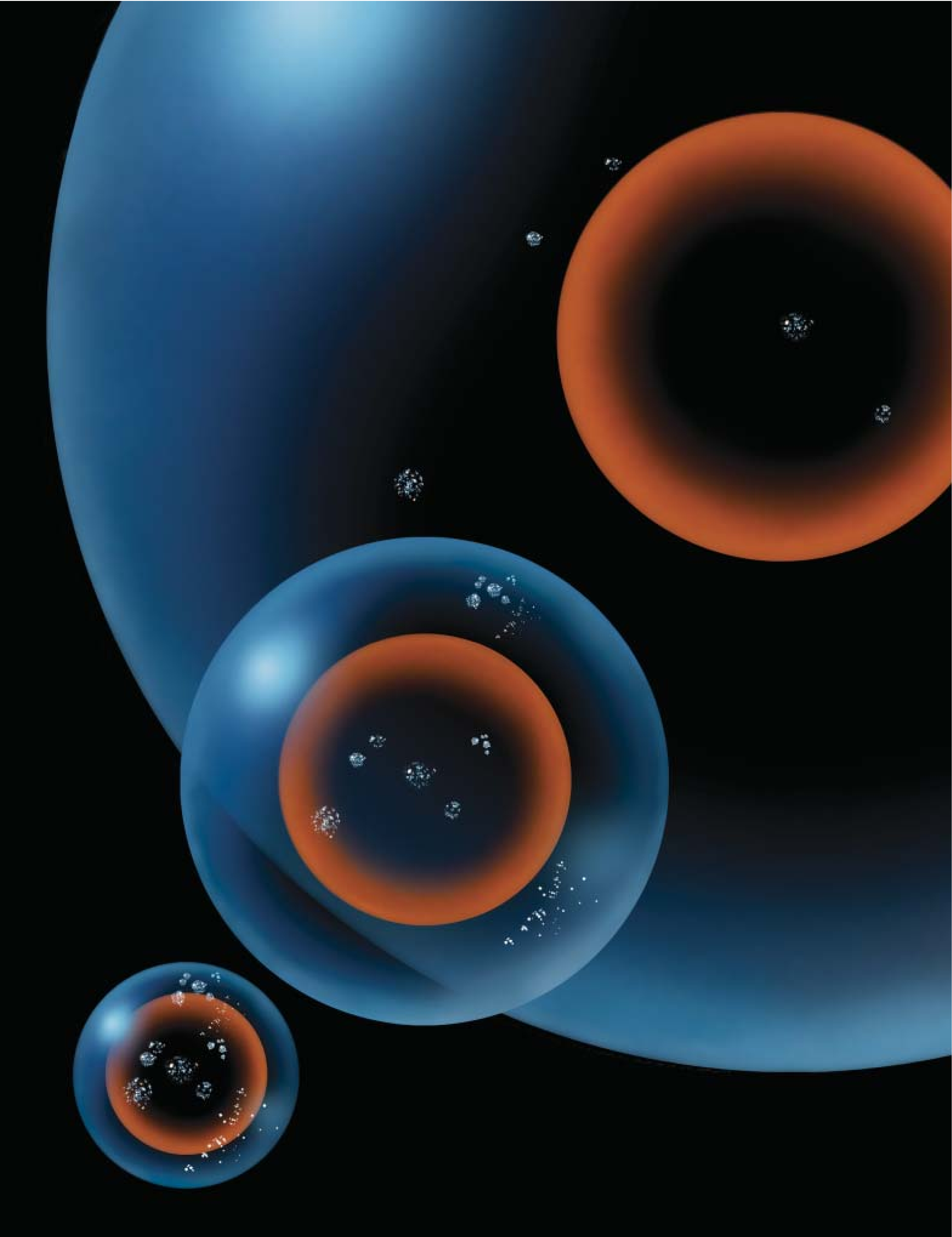
EINSTEIN PROFETA Y HEREJE. Luis Navarro Veguillas. Tusquets, Metatemas (21), 1990.

ALBERT EINSTEIN. CARTAS A MILEVA. Introducción de José Manuel Sánchez Ron. Mondadori, 1990.

ALBERT EINSTEIN. CORRESPONDENCIA CON MICHELE BESSO. Dirigido por P. Speziali. Tusquets, Metatemas (36), 1994.

HISTORIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA. 1. EL PERÍODO FUNDACIONAL (1860-1926). José Manuel Sánchez Ron. Crítica, Drakontos, 2001.

EINSTEIN 1905: UN AÑO MILAGROSO. CINCO ARTÍCULOS QUE CAMBIARON LA FÍSICA. Edición e introducciones de John Stachel. Crítica, Drakontos, 2001.



# La constante cosmológica

## Una nueva presentación de la constante cosmológica de Einstein puede señalar el camino que lleve a superar la relatividad general

Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner

En 1917, Albert Einstein tenía que conciliar su nueva teoría de la gravedad, la relatividad general, con los limitados conocimientos de que se disponía en aquella época acerca del universo. Como la mayoría de sus contemporáneos, estaba convencido de que el universo debía ser estático —ni expansionarse, ni contraerse—, pero tal estado no era compatible con sus ecuaciones de la gravedad. En una huida hacia adelante, agregó a sus ecuaciones una entidad *ad hoc,* un término cosmológico que compensaba la gravedad y permitía una solución estática.

Pero doce años más tarde Edwin Hubble descubrió que el universo distaba de ser estático. Encontró que las galaxias remotas se alejaban de la nuestra a una velocidad proporcional a su lejanía. No se necesitaba ningún término cosmológico para explicar un universo en expansión. Einstein abandonó la idea. Cuenta George Gamow en su autobiografía que "Einstein, hablando de problemas cosmológicos, me dijo que la introducción del término cosmológico había sido el mayor disparate de su vida".

Sin embargo, desde los seis últimos años el término cosmológico —ahora conocido como constante cosmológica— ha vuelto a la palestra. Ha resurgido para desempeñar una función central en la física del siglo XXI. En esta segunda vida difiere, no obstante, de la idea original de Einstein. Ahora debe su resurrección a un hallazgo reciente: la expansión del universo se acelera; además, para mayor ironía, arranca de los principios de la mecánica cuántica, rama de la física que, como es sabido, Einstein aborrecía. Muchos confían en que el término cosmológico nos dé la clave para dejar atrás la teoría de Einstein y profundizar en el conocimiento del espacio, el tiempo y la gravedad; quizás, incluso, para descubrir una teoría cuántica que unifique la gravedad con las demás fuerzas fundamentales de la naturaleza. Es demasiado pronto para saber adónde nos llevará, pero cabe pensar que nuestra concepción del universo no permanecerá intangible.

UN UNIVERSO SOLITARIO podría ser nuestro destino si la expansión cósmica sigue acelerándose, impelida quizá por la constante cosmológica. Las esferas anaranjadas representan el universo observable, que crece a la velocidad de la luz; las esferas azules representan una parte del espacio en expansión. A medida que la expansión se acelera, se observan menos cúmulos de galaxias.

DON DIXON

## Nacimiento de una constante

La relatividad general fue el fruto del trabajo de Einstein durante los diez años que siguieron a su decisiva intuición de 1907: que la gravedad y el movimiento acelerado son equivalentes. De acuerdo con un famoso experimento ideal suyo, la física que se cumplía en el interior de un ascensor en reposo en un campo gravitatorio uniforme de intensidad *g* era exactamente la misma que la física que operaba en el interior de un ascensor lanzado hacia el espacio vacío con una aceleración uniforme *g*.

Einstein recibió un influjo poderoso de Ernst Mach. Rechazaba éste la idea de un sistema de referencia absoluto para el espaciotiempo. En la física newtoniana, la inercia refleja la tendencia de un objeto a moverse con velocidad constante a menos que se halle condicionado por una fuerza. La noción de velocidad constante requiere un sistema de referencia inercial, no acelerado. Ahora bien, no acelerado ¿con respecto a qué? Newton postuló la existencia del espacio absoluto, un sistema de referencia inmóvil que definía todos los sistemas inerciales locales. Para Mach, en cambio, la distribución de materia en el universo definía los sistemas inerciales. La teoría general de la relatividad de Einstein incluye, en buena medida, la tesis del físico austríaco.

La teoría de Einstein fue la primera concepción de la gravedad que ofrecía en potencia un cuadro coherente del universo. No sólo abarcaba el movimiento de los objetos por el espacio y el tiempo, sino también la propia evolución dinámica del espacio y del tiempo. Al intentar describir el universo con su nueva teoría, Einstein buscó una solución finita, estática y compatible con los principios de Mach (vale decir una distribución de materia finita que fuera perdiéndose en un vacío, por ejemplo, no satisfaría la idea machiana de que se necesitaba materia para definir el espacio). Estos tres prejuicios llevaron a Einstein a introducir el término cosmológico, con el que llegaba a una solución estática y, aunque finita, sin fronteras; su universo se curvaba sobre sí mismo, a la manera de la superficie de un balón. Desde un punto de vista físico, el término cosmológico, aunque inobservable a la escala de nuestro sistema solar, producía, a escalas mayores, una repulsión cósmica que compensaba la atracción gravitatoria sobre los objetos distantes.

Sin embargo, el entusiasmo de Einstein por el término cosmológico menguó muy pronto. En 1917, Willem de Sitter demostró que las ecuaciones de Einstein completadas con el término cosmológico tenían una solución —un espaciotiempo— sin materia, resultado no muy machiano que se diga. Más tarde, se vio que ese modelo no era estático. En 1922, Alexander Friedmann construyó modelos de universos en expansión y en contracción que no requerían el término cosmológico. Y en 1930 Arthur Eddington demostró que el universo de Einstein no era realmente estático: el equilibrio entre la gravedad y el término cosmológico resultaba tan precario, que bastaban pequeñas perturbaciones para que se produjera una contracción o una expansión desbocadas. En 1931, con la expansión del universo firmemente establecida por Hubble, Einstein había ya abandonado su término cosmológico. "Considerado desde una óptica teórica, resultaba insatisfactorio", declaró.

El descubrimiento de Hubble acabó con la necesidad del término cosmológico para compensar la gravedad. En un universo que se expande, la gravedad debe frenar la expansión. Cabe entonces preguntarse si la gravedad adquirirá intensidad suficiente para detener la expansión y obligar al universo a contraerse o si, por el contrario, el cosmos se expandirá para siempre. En los modelos de Friedmann, la respuesta guarda relación con la densidad media de materia: un universo de densidad elevada se contraerá indefinidamente (colapsará), mientras que un universo de densidad baja se expandirá por toda la eternidad. La línea divisoria se halla en el universo de densidad crítica, que se expande sin fin, aunque a velocidad siempre decreciente. Puesto que en la teoría de Einstein la curvatura media del universo guarda relación con la densidad media, van ligados la geometría y el sino del cosmos. El universo de densidad elevada tiene curvatura positiva, similar a la superficie de un balón; el de baja densidad, curvatura negativa, a la manera de una silla de montar; por último, el de densidad crítica es espacialmente plano. En resumen, los cosmólogos vinieron a creer que la determinación de la geometría del universo nos revelaría su destino.

## La energía de la nada

El término cosmológico desapareció de la cosmología a lo largo de los seis decenios subsiguientes, salvo una esporádica reaparición en que se subsumió en la teoría del estado estacionario, enunciada a finales de los años cuarenta y descartada en los sesenta. Pero quizá lo más sorprendente acerca del término estribe en otro fenómeno: aun cuando Einstein no lo hubiera introducido en un momento de confusión, mientras gestaba la relatividad general, habríamos acabado por comprender que su presencia resulta inevitable. En su actual conformación, no deriva de la relatividad, que gobierna la naturaleza a las mayores escalas, sino de la mecánica cuántica, la física de lo más pequeño.

Esta nueva concepción del término cosmológico difiere bastante de la enunciada por Einstein. Su ecuación de campo original, $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, relaciona la curvatura del espacio, $G_{\mu\nu}$, con la distribución de materia y energía, $T_{\mu\nu}$, donde G es la constante de Newton que ca-


## Resumen

- La mecánica cuántica y la relatividad, combinadas con el descubrimiento de que el universo se expande, han llevado a los físicos a retomar el término cosmológico que Einstein introdujo y después repudió. Pero ahora representa una misteriosa forma de energía que impregna el espacio vacío y acelera la expansión cósmica.
- El esfuerzo por entender el origen de esta energía quizá deje atrás la teoría de Einstein y cambie nuestra concepción del universo.

racteriza la intensidad de la gravedad. Cuando Einstein añadió el término cosmológico, lo puso en el lado izquierdo de la ecuación, dando a entender que era una propiedad del propio espacio. Si lo trasladase al lado derecho, adquiriría un sentido radicalmente nuevo, el que tiene hoy día: una nueva y extraña forma de densidad de energía que permanece constante, incluso cuando el universo se expande, y cuya gravedad no es repulsiva, sino atractiva.

La invariancia de Lorentz, la simetría fundamental asociada con ambas teorías de la relatividad, la especial y la general, dicta que sólo el espacio vacío puede alcanzar esta clase de densidad de energía. Desde esa perspectiva, resulta más extraño aún el término cosmológico. Ante la pregunta sobre cuál sea la energía del espacio vacío, la mayoría respondería que “nada”. La intuición así lo entiende.

Mas, por desgracia, la mecánica cuántica dista mucho de ser intuitiva. A las escalas más pequeñas, donde los efectos cuánticos se vuelven importantes, ni siquiera el espacio vacío está realmente vacío. Muy al contrario, lo pueblan pares de partículas y antipartículas virtuales, que recorren cortas distancias y desaparecen. Todo allí resulta tan efímero, que no puede observarse directamente. Lo que no empece que cuenten, y mucho, sus efectos indirectos; pueden medirse. Las partículas virtuales, por citar un ejemplo, alteran, de una forma mensurable, el espectro del hidrógeno. De hecho, se ha medido.

Una vez aceptada esta premisa, hay que admitir que esas partículas virtuales podrían dotar de alguna energía no nula al espacio vacío. La mecánica cuántica considera, pues, obligatorio el término cosmológico de Einstein, no opcional. No cabe prescindir del mismo con un “teóricamente insatisfactorio”. Pero existe un problema. Todos los cálculos y estimaciones de la magnitud de la energía del espacio vacío conducen a valores tales, que resultan absurdos: entre 55 y 120 órdenes de magnitud superiores a la energía de toda la materia y la radiación del universo observable. Si la densidad de energía del vacío fuera de esas proporciones, la materia del universo se dispersaría al instante.

Con esa china en el zapato han venido batallando los teóricos desde hace tres decenios, por lo menos. En principio, debía haberse advertido tal dificultad en los años treinta, época en que se empezaron a calcular los efectos de las partículas virtuales. Pero en todas las áreas de la física, con la excepción de las relacionadas con la gravedad, carece de interés la energía absoluta de un sistema; sólo importan las diferencias de energías entre los estados (por ejemplo, las diferencias de energías entre el estado fundamental de un átomo y sus estados excitados). Si se añade una constante a todos los valores de las energías, desaparecerá en los cálculos; puede, pues, ignorarse. Además, por entonces, los físicos no prestaban atención suficiente a la cosmología como para preocuparse de aplicarle la teoría cuántica.

Pero la relatividad general establece que todas las formas de ener-

EL TERMINO COSMOLOGICO

## Un cambio de significado

El núcleo de la teoría de la relatividad general de Einstein es la ecuación de campo, según la cual la geometría del espaciotiempo ($G_{\mu\nu}$, el tensor de curvatura de Einstein) está determinada por la distribución de materia y de energía ($T_{\mu\nu}$, el tensor energía-momento), donde $G$ es la constante de Newton que caracteriza la intensidad de la gravedad. (Un tensor es una entidad geométrica o física que se puede representar por medio de un conjunto de números.) En otras palabras, la materia y la energía le dicen al espacio cómo se ha de curvar.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

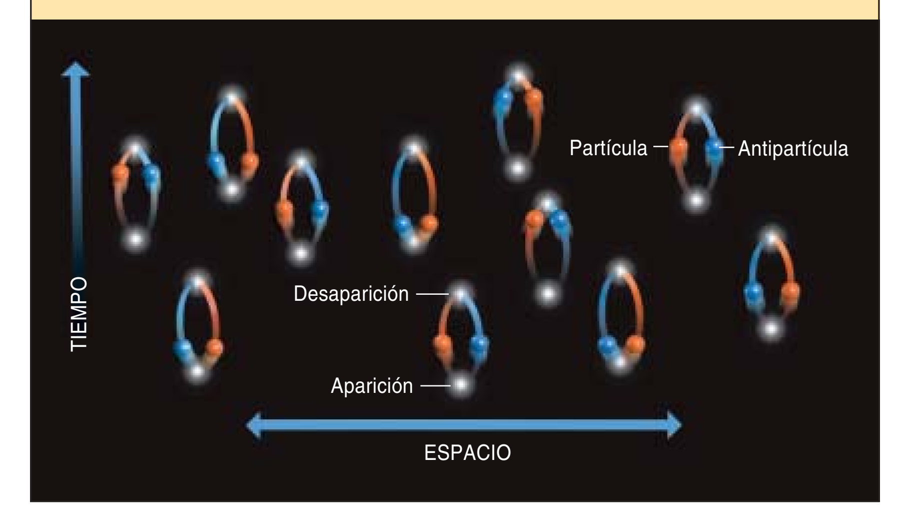
Einstein introdujo el término cosmológico $\Lambda$ para que compensase la atracción de la gravedad a escalas cósmicas; se obtenía así un universo estático. Añadió el término (multiplicado por $g_{\mu\nu}$, el tensor métrico del espaciotiempo, que define las distancias) al lado izquierdo de la ecuación de campo; daba así a entender que era una propiedad del espacio. Pero abandonó el término una vez quedó claro que el universo se expandía.

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

El nuevo término cosmológico que hoy se investiga es una consecuencia de la teoría cuántica, que indica que el espacio vacío puede poseer una densidad de energía. Este término —$\rho_{VAC}$, la densidad de energía del vacío, multiplicada por $g_{\mu\nu}$— debe ir al lado derecho de la ecuación de campo con las otras formas de energía.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} + \rho_{VAC} g_{\mu\nu})$$

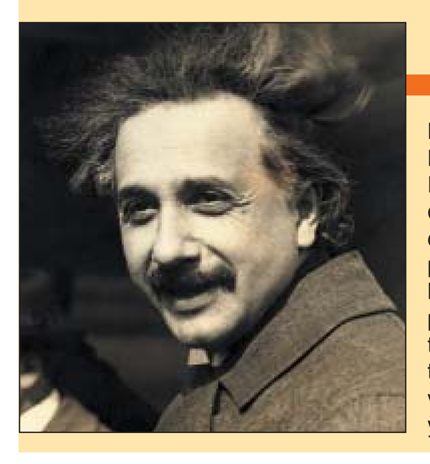
Aunque matemáticamente equivalentes, el término cosmológico de Einstein y la energía del vacío cuántico divergen en su significación conceptual; aquél constituye una propiedad del espacio, ésta una forma de energía ligada a los pares virtuales partícula-antipartícula. La teoría cuántica mantiene que estas partículas virtuales salen sin cesar del vacío, existen durante un brevísimo intervalo de tiempo y desaparecen (*abajo*).



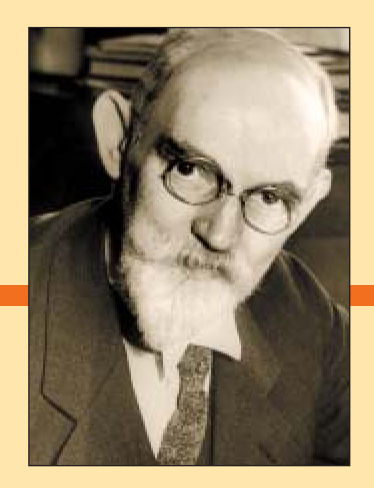

SLIM FILMS

## Los hitos

Desde que Einstein lo concibiera hace casi 90 años, el término cosmológico ha pasado por el rechazo, la remodelación y reasunción. Aquí se exponen algunos de los hitos.

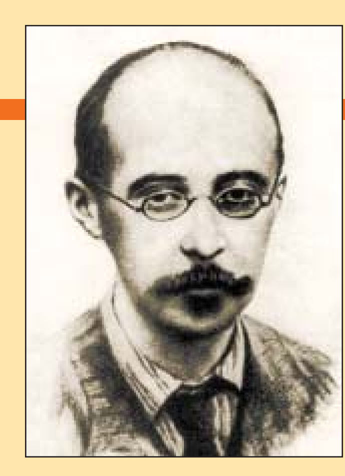


**FEBRERO DE 1917:** Einstein introduce el término cosmológico para compensar la gravedad; le permitió construir un modelo teórico de universo estático y finito.



**MARZO DE 1917:** Willem de Sitter construye un modelo alternativo también con término cosmológico. Más tarde, se demostró que implica una expansión acelerada.

**1922:** Alexander Friedmann construye modelos de universos en expansión y en contracción sin un término cosmológico.



UNDERWOOD & UNDERWOOD/CORBIS (*Einstein*); OBSERVATORIO YERKES (*de Sitter*); *SOVIET PHYSICS-USPEKHI*, CORTESIA DE AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES (*Friedmann*)

gía, incluida la energía de la nada, actúan como una fuente de gravedad. En los años sesenta, Yakov Borisovich Zel'dovich cayó en la cuenta del interés del problema. Acometió las primeras estimaciones de la densidad de energía del vacío. A partir de entonces, los teóricos se propusieron esclarecer por qué sus cálculos daban unos valores tan desmedidos. Algún mecanismo desconocido, razonaban, debía anular la mayor parte de la energía del vacío, si no toda. En realidad, suponían que el valor más verosímil era cero; hasta la nada cuántica debía carecer de peso.

Mientras los teóricos persistieron en la creencia de que tenía que existir tal mecanismo de anulación, pudieron dejar de lado el problema del término cosmológico. Aunque fascinante, resultaba prescindible. Pero intervino la naturaleza.

### Con creces

La primera prueba sólida de que algo no acaba de encajar llegó con ciertas mediciones aprestadas para determinar a qué ritmo se frenaba la expansión del universo. Recordemos que Hubble descubrió que las velocidades relativas de las galaxias remotas eran proporcionales a su distancia de nuestra galaxia. Desde el punto de vista de la relatividad general, esta correlación se debe a la expansión del propio espacio, que ha de frenarse con el tiempo en virtud de la atracción gravitatoria. Y como las galaxias remotas se ven según eran hace miles de millones de años, el frenado de la expansión ha de curvar la relación de Hubble; lineal en los demás aspectos. Vale decir, la recesión de las galaxias más distantes ha de ser más veloz que lo predicho por la ley de Hubble. Así las cosas, la tarea consistía, por lo tanto, en determinar con precisión las distancias y las velocidades de las galaxias más remotas.

Para esa medición había que encontrar objetos de luminosidad intrínseca conocida, que sirvieran de referencia; es decir, cuerpos que brillasen lo suficiente para que pudiésemos verlos a través del universo y de cuya luminosidad deducir la distancia a que se encontrasen. Se alcanzó ese hito en los años noventa, con la calibración de las supernovas de tipo Ia; se trata de explosiones termonucleares de estrellas enanas blancas con una masa de alrededor de 1,4 veces la solar. Dos grupos —el Proyecto Cosmología y Supernovas, dirigido por Saul Perlmutter, del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, y el Equipo Supernovas de z Elevado, dirigido por Brian Schmidt, de los Observatorios Mount Stromlo y Siding Spring— emprendieron la medición del frenado de la expansión del universo con este tipo de supernovas. A comienzos de 1998, ambos grupos convergieron en un mismo descubrimiento, sorprendente: durante los últimos cinco mil millones de años, se ha ido acelerando la expansión, no frenándose. Desde entonces, se han venido consolidándose las pruebas de la aceleración cósmica; además, no sólo las tenemos de la actual fase de aceleración, sino también de una época anterior de deceleración.

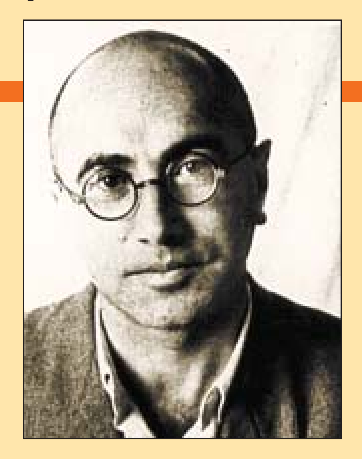
Los datos de las supernovas, sin embargo, no agotan las pruebas de que alguna nueva forma de energía domina la expansión cósmica. La mejor información de que disponemos acerca del universo primitivo proviene de las observaciones del fondo cósmico de microondas (FCM), la radiación residual de la gran explosión que lleva inscritas las características del universo cuando sólo tenía unos 400.000 años. Con las mediciones harto precisas, realizadas en el año 2000, del tamaño angular de las variaciones del FCM a través del cielo se pudo determinar que el universo es plano. Han confirmado este descubrimiento una nave espacial que observa el FCM, la Sonda Wilkinson de la Anisotropía de las Microondas, y algunos experimentos más.

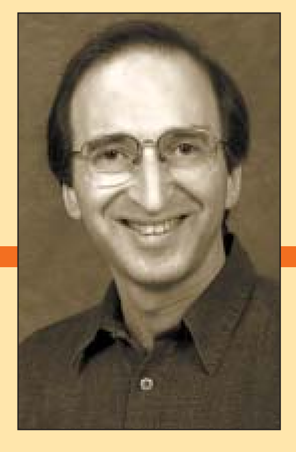
Una geometría espacialmente plana obliga a que la densidad media del universo sea igual a la densidad crítica. Ahora bien, numerosas mediciones de cada una de las formas de materia —incluida la materia oscura fría, un supuesto mar de partículas que se mueven lentamente y no emiten luz, aunque sí que ejercen una atracción gravitatoria— han mostrado que la materia contribuye sólo en alrededor de

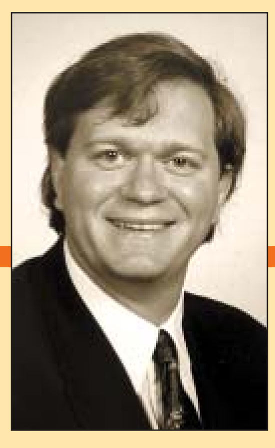


**1929:** Edwin Hubble descubre que el universo está en expansión. Dos años después, Einstein abandona el término cosmológico. En su opinión resultaba ser teóricamente insatisfactorio”.

**1967:** Yakov Borisovich Zel’dovich estima la densidad de energía del vacío cuántico y encuentra que daría un término cosmológico elevadísimo.







**1998:** Dos equipos estudiosos de las supernovas dirigidos por Saul Perlmutter (*izquierda*) y Brian Schmidt (*derecha*) anuncian que la expansión cósmica se está acelerando. Un término cosmológico remodelado produciría este efecto. Desde 1998, se han acumulado las pruebas de la aceleración cósmica.



un 30 por ciento a la densidad crítica. Un universo plano requiere, por tanto, alguna otra forma de energía, repartida de manera homogénea, que no ejerza influencia observable en las acumulaciones locales de materia y, pese a ello, sume el 70 por ciento de la densidad crítica. La energía del vacío, o algo muy parecido a ella, produciría el efecto deseado.

Desde una tercera línea de razonamiento se apuntaba en el mismo sentido: la aceleración cósmica constituía la pieza que faltaba en el rompecabezas cosmológico. A lo largo de veinte años, el modelo de la inflación con materia oscura fría se convirtió en la principal explicación de la estructura del universo. La teoría de la inflación mantiene que, en sus primerísimos momentos, el universo sufrió un ingente pulso de expansión que suavizó y aplanó su geometría y amplió las fluctuaciones cuánticas de la densidad de energía, de tamaños subatómicos a magnitudes cósmicas. En el transcurso de ese período se produjo la distribución de materia ligeramente inhomogénea que llevó a las variaciones que se ven en el FCM y a las estructuras del universo actual. La gravedad de la materia oscura fría, que supera por mucho a la de la materia ordinaria, gobernó la formación de estas estructuras.

A mediados de los noventa, sin embargo, las observaciones pusieron en entredicho ese modelo explicativo. El nivel predicho de aglomeración de la materia difería del que se estaba midiendo. Peor aún, la edad del universo predicha parecía ser menor que la edad de las estrellas más viejas. En 1995 indicamos que estas contradicciones desaparecían si la energía del vacío representaba unos dos tercios de la densidad crítica. (Este modelo difería del universo cerrado de Einstein, en el que la densidad del término cosmológico era la mitad que la de la materia.) Dada la movida historia de la energía del vacío, nuestra idea constituía una provocación.

Pero diez años más tarde todo cuadra. Además de explicar la actual aceleración cósmica y el período de deceleración previo, el resurgido término cosmológico modifica la edad del universo; ahora llega casi a los 14.000 millones de años (más, y con un margen suficiente, que la edad de las estrellas más viejas); amén de añadir la suficiente energía para llevar el universo a la densidad crítica. No sabemos si esa energía realmente proviene del vacío cuántico. Dada la importancia que tendría descubrir la causa de la aceleración cósmica, urge cuantificar la energía del vacío. No puede obviarse ya la determinación del peso de la nada, dejar la tarea a las futuras generaciones. Y el rompecabezas parece ahora todavía más confuso que cuando se perseguía una teoría que anulara la energía del vacío. Importa explicar por qué la energía del vacío no es cero, aunque sí tan pequeña como para que sus efectos en el cosmos cuenten sólo desde hace algunos miles de millones de años.

Nada más apasionante para los científicos que un problema de este calibre e importancia. Así como a Einstein le condujo a la relatividad general la incompatibilidad de la relatividad especial y la teoría newtoniana de la gravedad, hoy en día creemos que la teoría einsteiniana es incompleta porque no puede incorporar las leyes de la mecánica cuántica. Pero las observaciones cosmológicas quizás iluminen la relación entre la gravedad y la mecánica cuántica en sus aspectos más fundamentales. La equivalencia de los sistemas referenciales acelerados y la gravedad indicó a Einstein el camino; otra clase de aceleración, la aceleración cósmica, podría marcárnoslo a nosotros. Los teóricos han esbozado ya un mapa provisional.

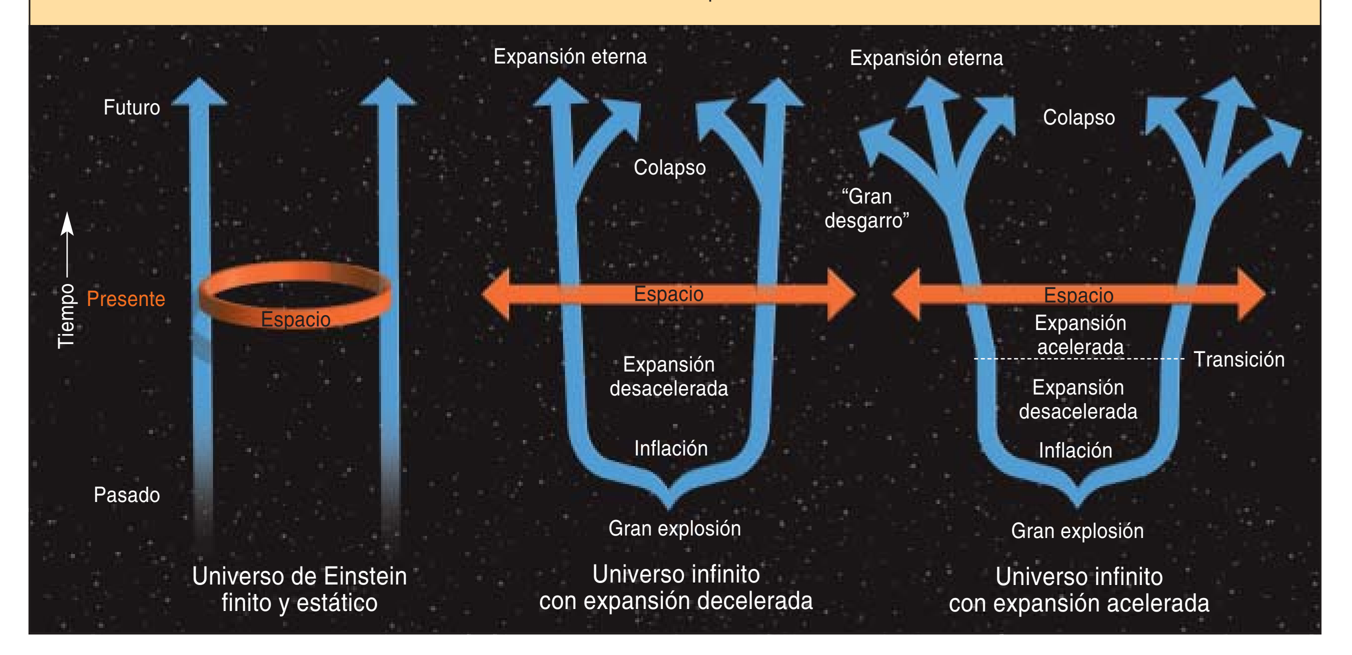
## El supermundo

La teoría de cuerdas, llamada también teoría M, parece a muchos una vía prometedora hacia la unificación de la mecánica cuántica y la gravedad. Tiene en la supersimetría, o SUSY, uno de sus principios básicos. Consiste en una simetría entre las partículas de espín semientero, o fermiones (quarks y leptones), y las de espín entero, los bosones (fotones, gluones y otros transmisores de fuerzas). En un mundo en el que SUSY se manifestara plena-

TEORIAS EN EVOLUCION

## Modelos de cosmos: entonces y ahora

El modelo cosmológico de Einstein (*izquierda*) representaba un universo, finito en el espacio e infinito en el tiempo, que conserva el mismo tamaño eternamente. Carente de límites espaciales, se curva sobre sí mismo como un círculo. Tras el descubrimiento de la expansión cósmica, los cosmólogos construyeron un modelo de universo infinito en el que el ritmo de expansión se iba frenando a causa de la gravedad (*centro*), quizá hasta el punto de que acabara desplomándose sobre sí mismo. En los años ochenta los teóricos añadieron una fase previa de rápido crecimiento; de esa fase anterior de inflación, se tienen ya bastantes indicios. En los seis últimos años, las observaciones han demostrado que la expansión cósmica empezó a acelerarse hace unos cinco mil millones de años (*derecha*). El destino último del universo —expansión continuada, colapso o una hiperaceleración o "gran desgarro"— depende de la naturaleza de la misteriosa energía oscura que está generando la acelerada expansión.




mente, una partícula y su supercompañera poseerían la misma masa; por ejemplo, el electrón supersimétrico (selectrón) sería tan ligero como el electrón, y así sucesivamente. Se puede demostrar que, en ese supermundo, la nada cuántica no pesaría y el vacío tendría energía cero.

Sin embargo, sabemos que en el mundo real no puede existir un selectrón tan ligero como el electrón: se habría detectado en los aceleradores de partículas. (Se conjetura que las partículas supercompañeras son millones de veces más pesadas que los electrones; por eso no pueden hallarse sin aceleradores más potentes.) SUSY debe ser, por tanto, una simetría rota: la nada cuántica podría pesar un poco.

Se han ideado modelos de supersimetría rota que dan una densidad de energía del vacío menor, en muchos órdenes de magnitud, que las elevadísimas estimaciones mencionadas. Pero aun así supera con creces la indicada por las observaciones cosmológicas. Hace poco, sin embargo, se ha reconocido que la teoría M parece permitir un número casi infinito de soluciones diferentes. Aunque la mayoría de esas posibles soluciones ofrecería una energía del vacío demasiado alta, algunas sí podrían rendir una tan baja como la que observamos.

Otro hito de la teoría de supercuerdas es la introducción de dimensiones adicionales, seis o siete dimensiones espaciales, todas ocultas a la vista excepto las tres usuales. Dicho constructo ofrece una manera inédita de explicar la aceleración cósmica. Georgi Dvali y su equipo, de la Universidad de Nueva York, han propuesto que el efecto de las dimensiones extra quizá se manifieste como un término adicional en las ecuaciones de campo de Einstein, que ocasionaría una expansión acelerada del universo [*véase* "Salir de la oscuridad, por Georgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2004]. Este enfoque va en contra de lo que se esperaba: durante muchos años se ha supuesto que en las distancias cortas sería donde cabría buscar diferencias entre la relatividad general y su teoría sucesora, no a escala cósmica. Si la hipótesis de Dvali está en lo cierto, los presagios de una nueva concepción del cosmos vendrán de las mayores distancias, no de las menores.

Cabe la posibilidad de que la explicación de la aceleración cósmica no tenga nada que ver con que el término cosmológico sea tan pequeño o con la manera en que se pueda extender la teoría de Einstein para que incluya la mecánica cuántica. La relatividad general estipula que la gravedad de un objeto es proporcional a su densidad de energía más tres veces su presión interna. Cualquier forma de energía con una presión grande y negativa —que tire hacia dentro, como una lámina elástica, en vez de empujar hacia fuera, como un globo de gas— tendrá, por tanto, una gravedad repulsiva. La aceleración cósmica podría, pues, haber revelado, lisa y llanamente,

la existencia de la energía oscura, una forma insólita de energía que no predicen ni la mecánica cuántica ni la teoría de cuerdas.

## Geometría y destino

En cualquier caso, el descubrimiento de la aceleración cósmica ha transformado nuestra concepción del futuro. El destino se ha desligado de la geometría. Una vez aceptamos la existencia de la energía del vacío o de algo similar, cabe cualquier sino. Un universo plano dominado por una energía del vacío positiva se expandirá para siempre a un ritmo cada vez mayor, mientras que otro dominado por una energía del vacío negativa colapsará. Y si la energía oscura no es en absoluto energía del vacío, su futuro efecto sobre la expansión cósmica resulta incierto. Al contrario que una constante cosmológica, la densidad de energía oscura podría crecer o menguar con el tiempo. Si la densidad crece, la aceleración cósmica aumentará: las galaxias, los sistemas solares, los planetas y los átomos, en este orden, se disgregarán en un lapso de tiempo finito. Pero si la densidad cae, la aceleración podría cesar. Y si la densidad se hace negativa, el universo quizá colapse. Nosotros hemos demostrado que, si no se conoce con detalle el origen de la energía que hoy impele la expansión, ningún conjunto de observaciones cosmológicas podrá establecer el fin último del universo.

Para encajar este rompecabezas, quizá necesitemos una teoría fundamental que nos permita predecir y categorizar la aportación gravitatoria de cada una de las posibles contribuciones a la energía del espacio vacío. En otras palabras, la física de la nada determinará el sino de nuestro universo. Para dar con la solución puede que se requieran nuevas mediciones, de la expansión cósmica y de las estructuras que se forman en ella, que orienten a los teóricos. Afortunadamente, se están planeando muchos experimentos nuevos, entre ellos un telescopio espacial que observará las supernovas remotas y otros, tanto terrestres como espaciales, que analizarán la energía oscura a través de su efecto en el desarrollo de las macroestructuras cósmicas.

Nuestro conocimiento del mundo físico suele desarrollarse en una atmósfera de confusión creadora. La niebla de lo desconocido condujo a Einstein a considerar el término cosmológico como un recurso desesperado en la construcción de un universo estático, machiano. Hoy en día, la confusión acerca de la aceleración cósmica nos lleva a explorar cada camino que nos pueda enseñar acerca de la energía que impulsa la aceleración. La buena nueva es que, aunque muchas rutas lleven a vías muertas, la resolución de este profundo y paradójico misterio quizá nos sirva para unificar la gravedad con las demás fuerzas de la naturaleza, la gran esperanza de Einstein.

### Los autores

**Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner** fueron de los primeros en argumentar que el universo está dominado por un término cosmológico radicalmente diferente del que introdujo, y después repudió, Einstein. Su predicción, en 1995, de una aceleración cósmica fue confirmada por las observaciones astronómicas tres años más tarde. Krauss es profesor del departamento de física en la Universidad Case de la Reserva Federal. Turner ocupa la cátedra Bruce V. Rauner de la Universidad de Chicago.

### Bibliografía complementaria

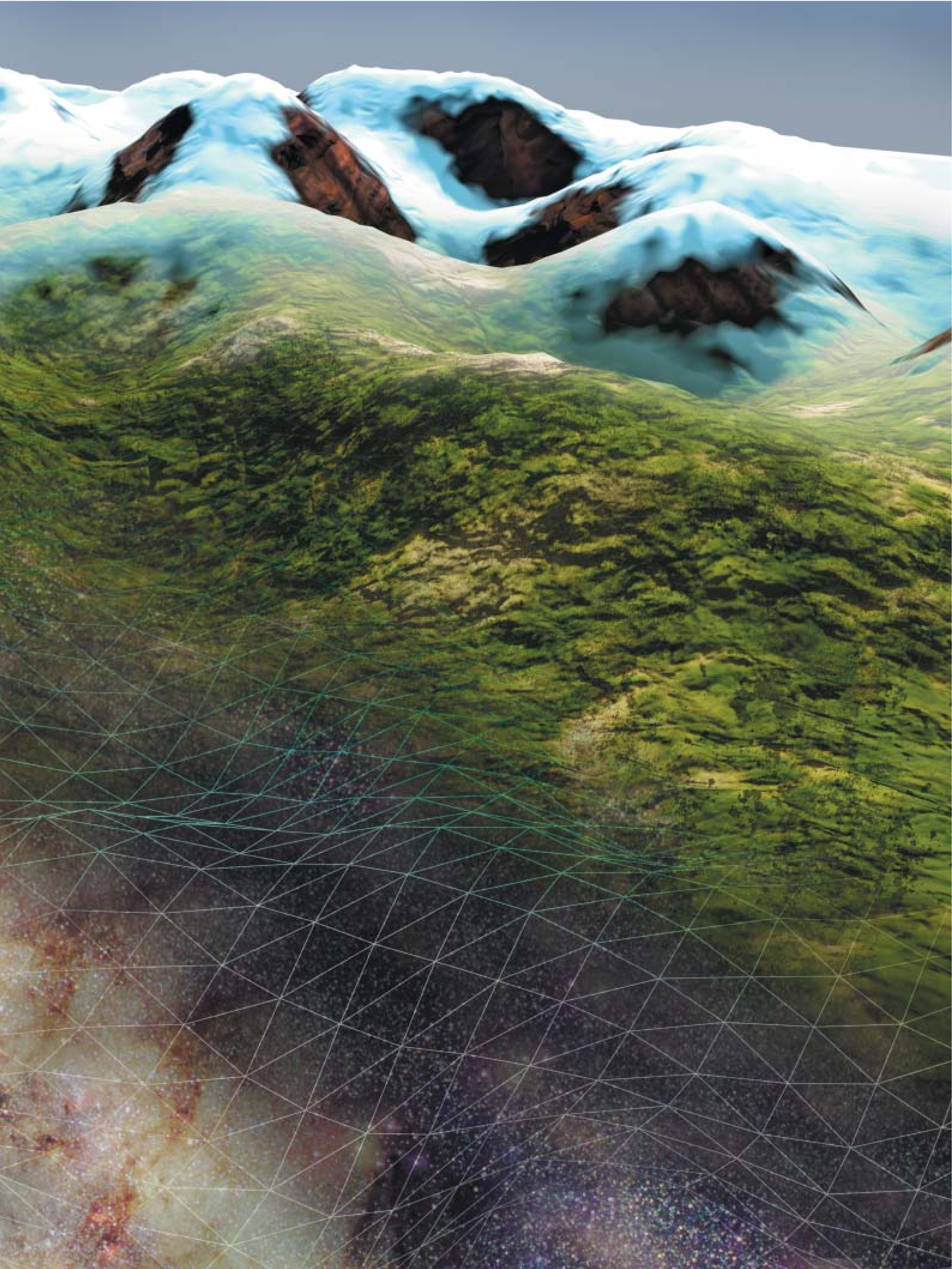
SUBTLE IS THE LORD: THE SCIENCE AND LIFE OF ALBERT EINSTEIN. Abraham Pais. Oxford University Press, 1982.

THE COSMOLOGICAL CONSTANT PROBLEM. Steven Weinberg en *Reviews of Modern Physics*, vol. 61, n.º 1, páginas 1-23; 1989.

THE OBSERVATIONAL CASE FOR A LOW DENSITY UNIVERSE WITH A NON-ZERO COSMOLOGICAL CONSTANT. J. P. Ostriker y P. J. Steinhardt en *Nature*, vol. 377, págs. 600-602; 19 de octubre, 1995.

THE COSMOLOGICAL CONSTANT IS BACK. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *General Relativity and Gravitation*, vol. 27, n.º 11, págs. 1135; 1995.

GEOMETRY AND DESTINY. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *General Relativity and Gravitation*, vol. 31, n.º 10, págs. 1453-1459; octubre 1999.



# El paisaje de la teoría de cuerdas

**La teoría de cuerdas predice que el universo ocupa al azar un "valle" de entre una colección casi infinita de hondonadas en un inmenso paisaje de posibilidades**

Raphael Bousso y Joseph Polchinski

Según la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, la gravedad equivale a la geometría del espacio y el tiempo, combinados en el espaciotiempo. Cualquier cuerpo dotado de masa deja una huella en la conformación de éste, según una ecuación formulada por Einstein en 1915. La masa de la Tierra, por ejemplo, hace que el tiempo transcurra un poco más deprisa para una manzana en lo alto de un árbol que para un físico que trabaje a su sombra. Cuando la manzana cae, en realidad responde a esa alteración del tiempo. La curvatura del espaciotiempo mantiene a la Tierra en órbita alrededor del Sol y aleja cada vez más a las galaxias remotas. Esta bella y sorprendente idea ha sido confirmada por numerosos experimentos de gran precisión.

Visto lo acertado que fue reemplazar la fuerza gravitatoria con la dinámica del espacio y del tiempo, ¿por qué no buscar una explicación geométrica para las demás fuerzas de la naturaleza, e incluso para el repertorio de partículas elementales? En esa búsqueda se empeñó Einstein gran parte de su vida. Le atrajeron en particular los trabajos del alemán Theodor Kaluza y del sueco Oskar Klein; mientras la gravedad refleja la forma de las cuatro dimensiones espaciotemporales que nos resultan familiares, el electromagnetismo, sostenían, resulta de la geometría de una quinta dimensión adicional demasiado sutil para que se vea directamente (al menos hasta ahora). La pesquisa de Einstein en pro de una teoría unificada con frecuencia se tilda de fracaso. Más bien, fue un intento prematuro: había que comprender primero las fuerzas nucleares y el papel crucial de la teoría cuántica de campos en la formulación de la física, conocimientos que no se alcanzaron hasta el decenio de 1970.

La búsqueda de una teoría unificada es una de las más destacadas actividades de la física teórica actual, y justo como había previsto Einstein, a los conceptos geométricos les toca un papel clave. La concepción de Kaluza-Klein ha sido desenterrada y ampliada, y se la ha incorporado a la teoría de cuerdas, un marco prometedor para la unificación de la mecánica cuántica, la relatividad general y la física de partículas. Tanto en la conjetura de Kaluza-Klein como en la teoría de cuerdas, las leyes de la física que nos son conocidas están sujetas a la forma y la talla de dimensiones microscópicas adicionales. ¿Qué determina su forma? Recientes avances teóricos y experimentales sugieren una respuesta sorprendente, objeto de controversia, que altera en gran medida nuestra imagen del universo.

## La teoría de Kaluza-Klein y las cuerdas

Kaluza y Klein propusieron su idea de una quinta dimensión a principios del siglo XX, cuando los científicos conocían dos fuerzas: el electromagnetismo y la gravedad. Ambas decaen proporcionalmente al cuadrado de la distancia de su fuente; resultaba tentador imaginarse que estaban relacionadas. Kaluza y Klein comprendieron que la teoría geométrica de la gravedad de Einstein podría aportar esa conexión si existiera una dimensión espacial adicional, si el espaciotiempo tuviera cinco dimensiones.

La idea no es tan extravagante como parece. Si la dimensión espacial adicional está enroscada en un círculo suficientemente pequeño, habrá escapado a nuestros mejores microscopios, esto es, a los más potentes aceleradores de partículas (*véase el recuadro* "Dimensiones adicionales"). Además, ya sabemos —por

LA TEORIA DE CUERDAS predice un paisaje teórico poblado por innumerables universos posibles. El paisaje tiene quizá $10^{500}$ valles; cada uno corresponde a un conjunto de leyes de la física válidas en vastas burbujas del espacio. Nuestro universo visible estaría situado en una región pequeña de una de tales burbujas.

DON FOLEY

la relatividad general— que el espacio es flexible. Las tres dimensiones que vemos se están expandiendo y fueron en otra época mucho más pequeñas, de modo que no resulta tan aventurado imaginar que existe otra dimensión que sigue siendo pequeña actualmente.

Aunque no podamos detectarla directamente, una dimensión adicional pequeña podría tener efectos indirectos que sí cabría observar. La relatividad general describiría entonces la geometría de un espaciotiempo de cinco dimensiones. Se pueden distinguir en esta geometría tres elementos: la forma de las cuatro dimensiones grandes del espaciotiempo, el ángulo entre la dimensión pequeña y las otras, y la circunferencia de la dimensión pequeña. El espaciotiempo grande se comporta según la relatividad general de cuatro dimensiones. En cada uno de sus puntos, el ángulo y la circunferencia poseen determinado valor, como dos campos definidos en el espaciotiempo que tomen ciertos valores en cada punto. Sorprendentemente, el campo del ángulo reproduce un campo electromagnético que vive en el mundo de cuatro dimensiones. Dicho de otra manera, las ecuaciones que gobiernan su comportamiento son idénticas a las del electromagnetismo. La circunferencia determina las intensidades relativas de las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias. Así pues, de una teoría de sólo la gravedad en cinco dimensiones, se obtiene una teoría tanto de la gravedad como del electromagnetismo en cuatro.

La posibilidad de las dimensiones adicionales ha acabado adquiriendo también relevancia en la unificación de la relatividad general y la mecánica cuántica. En la teoría de cuerdas, uno de los enfoques preferidos para esa unificación, las partículas son en realidad objetos unidimensionales, pequeñas hebras o anillos en vibración. El tamaño típico de una cuerda es del orden de la longitud de Planck, esto es, $10^{-33}$ centímetros. Por consiguiente, una cuerda parecerá un punto a no ser que se amplíe hasta esas escalas.

Para que las ecuaciones de la teoría sean matemáticamente coherentes, la cuerda tiene que vibrar en 10 dimensiones espaciotemporales; existirán, pues, seis dimensiones adicionales, demasiado pequeñas para que se las detecte. Además de las cuerdas, puede haber inmersas en el espaciotiempo unas láminas de varias dimensiones conocidas como “branas” (palabra derivada de “membranas”). Según la idea original de Kaluza-Klein, las funciones de onda cuánticas de las partículas ordinarias llenarían la dimensión adicional: las partículas mismas se extenderían por la dimensión adicional. La teoría de cuerdas, por el contrario, puede quedar confinada en una brana. La teoría de cuerdas también involucra flujos, fuerzas que pueden ser representadas por líneas de campo, de manera similar a la representación de las fuerzas en el magnetismo clásico (no cuántico).

En conjunto, el cuadro que dibuja la teoría de cuerdas parece más complicado que la teoría de Kaluza-Klein, pero la estructura matemática subyacente es en realidad más unificada y completa. Retiene la noción principal de la teoría de Kaluza-Klein: las leyes físicas que vemos dependen de la geometría de dimensiones adicionales ocultas.

## ¿Demasiadas soluciones?

La cuestión es: ¿qué determina la geometría? La relatividad general proporciona una respuesta: el espaciotiempo debe satisfacer las ecuaciones de Einstein; en palabras de John Wheeler, de la Universidad de Princeton, la materia le dice al espaciotiempo cómo curvarse, y el espaciotiempo le indica a la materia cómo moverse. Pero la solución de las ecuaciones no es única, de modo que están permitidas muchas geometrías diferentes. El caso de la geometría de cinco dimensiones de Kaluza-Klein constituye un ejemplo simple de esta falta de unicidad. La circunferencia de la dimensión pequeña puede tomar cualquier tamaño: en ausencia de materia, cuatro dimensiones grandes planas, más un círculo de cualquier tamaño, son una solución de las ecuaciones de Einstein. (También se dan otras soluciones múltiples similares cuando está presente la materia.)

En la teoría de cuerdas se tienen varias dimensiones adicionales, lo cual resulta en muchos más parámetros ajustables. Una dimensión adicional sólo se puede enroscar en un círculo. Cuando existen más, el manojo de dimensiones adicionales puede tomar muchas formas diferentes (técnicamente, “topologías”), tales como una esfera, una rosquilla, dos rosquillas unidas y así sucesivamente. Cada rosquilla (que forma como un “asa”) tiene una longitud y una circunferencia, lo que resulta en un amplísimo repertorio de geometrías posibles para las dimensiones pequeñas. Dejando de lado las asas, otros parámetros corresponden a las posiciones de las branas y las diferentes cantidades de flujo enrollado en torno a cada rizo (*véase el recuadro* “El estado del vacío”).

Pero las soluciones de esta vasta colección no son equivalentes: cada configuración tiene una energía potencial, determinada por los flujos, las branas y la curvatura misma de las dimensiones enroscadas. Esta energía se llama energía del vacío, porque es la energía del espaciotiempo cuando las cuatro dimensiones grandes carecen por completo de materia o de campos. La geometría de las dimensiones pequeñas intentará acomodarse para minimizar esta energía, al igual que una bola colocada en lo alto de una pendiente rodará hasta una posición más baja.

Para comprender las consecuencias que se derivan de esta minimización, centrémonos en un solo pará-


## Resumen

- Según la teoría de cuerdas, las leyes de la física que observamos dependen de la manera en que las dimensiones adicionales del espacio se curven como una diminuta sortija.
- El mapa de las posibles configuraciones de las dimensiones adicionales dibuja un “paisaje” donde cada valle corresponde a un conjunto de leyes estable.
- El universo visible entero se halla en una región del espacio asociada a un valle del paisaje donde las correspondientes leyes de la física permiten la evolución de la vida.

metro: el tamaño total del espacio oculto. Se puede trazar una curva que muestre cómo varía la energía del vacío conforme cambia este parámetro. En el recuadro “El paisaje de las cuerdas” se muestra un ejemplo. Para tamaños muy pequeños, la energía es alta, de modo que la curva comienza a la izquierda por arriba. Luego, de izquierda a derecha, cae formando tres valles, cada uno de ellos más bajo que el precedente. Finalmente, a la derecha, tras salir del último valle, desciende suavemente hacia un valor constante. El fondo del primer valle está por encima de la energía nula; el del medio es exactamente cero, y el de la derecha es inferior a cero.

La manera en que se comporta el espacio oculto depende de las condiciones iniciales, de dónde parte la “bola” que lo representa. Si la configuración parte a la derecha del último pico, la bola rodará hacia el infinito, y el tamaño del espacio oculto se incrementará sin límite (y acabará por no estar ya oculto). En otro caso, se aposentará en el fondo de una de las hondonadas, y la talla del espacio oculto se ajustará para minimizar la energía. Estos tres mínimos se distinguen en razón de la energía del vacío resultante: positiva, negativa o nula. En nuestro universo el tamaño de las dimensiones ocultas no cambia con el tiempo; si lo hiciera, observaríamos que las constantes de la naturaleza estarían cambiando. Por tanto, debemos encontrarnos en un mínimo. En particular, parece que nos encontramos en un mínimo con una energía de vacío ligeramente mayor que cero.

Al contar con más parámetros, deberíamos en realidad imaginarnos esta curva de energía del vacío como la sección de una superficie compleja y multidimensional, una especie de macizo con cimas y valles, que Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, ha dado en llamar paisaje de la teoría de cuerdas (*véase el recuadro* “El paisaje de las cuerdas”). Los mínimos de este paisaje multidimensional —el fondo de los valles donde podría detenerse una bola— corresponden a las configuraciones estables de espaciotiempo (incluyendo branas y flujos); se llaman vacíos estables.

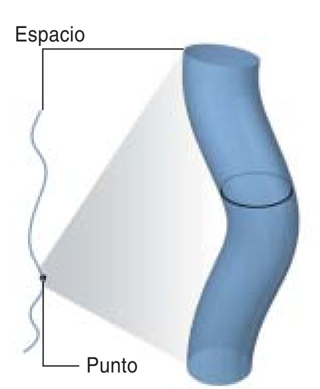
Un paisaje real sólo permite dos direcciones independientes (norte-sur y este-oeste), y eso es todo lo que somos capaces de dibujar. Pero el paisaje de la teoría de cuerdas es mucho más complicado, con cientos de direcciones independientes. Las dimensiones del paisaje no deben confundirse con las dimensiones espaciales del mundo real; cada eje mide no una posición en el espacio físico, sino algún aspecto de la geometría (pensemos en el tamaño de un asa o la posición de una brana).

El paisaje de la teoría de cuerdas dista de haber sido cartografiado. Calcular la energía de un estado del vacío es un problema difícil; por lo normal, sólo se consigue si se encuentran las aproximaciones adecuadas. Se han realizado últimamente continuos avances, sobre todo en 2003, cuando Shamit Kachru, Renata Kallosh y Andrei Linde, todos de la Universidad de Stanford, y Sandip Trivedi, del Instituto Tata de Investigación Fundamental, en Mumbai (India), encontraron pruebas convincentes de que el paisaje tiene, en efecto, mínimos donde el universo puede atollarse.

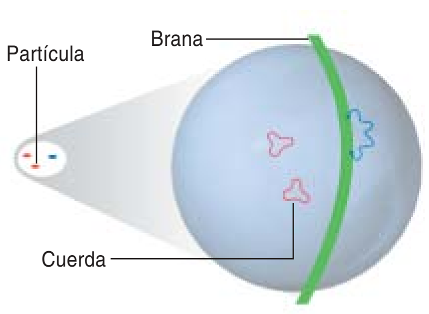
DIMENSIONES ADICIONALES

## Cuerdas y tubos

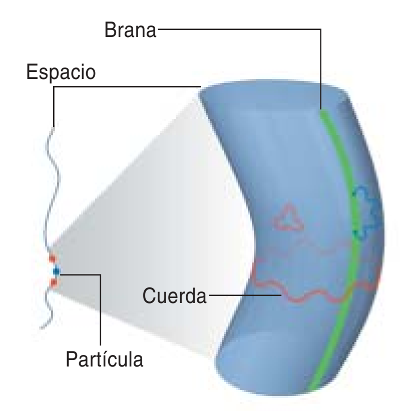
La teoría de Kaluza-Klein y la teoría de cuerdas incluyen, aparte de las tres que percibimos, minúsculas dimensiones espaciales adicionales. Para imaginárnoslas, pensemos en un espacio consistente en un tubo muy largo y muy fino. Visto de lejos, parecería no tener más que una dimensión, pero al ampliarlo mucho se pondría de manifiesto su forma cilíndrica. Cada punto sin dimensiones de la línea resultaría ser un círculo unidimensional del tubo. Según la teoría original de Kaluza-Klein, cada punto de nuestro conocido espacio tridimensional es en realidad un diminuto círculo.




Según la teoría de cuerdas, lo que parecen partículas puntuales son en realidad pequeñas cuerdas. Predice además la existencia de objetos parecidos a membranas, las branas (*verde*), de distinta dimensionalidad. Las cuerdas con extremos (*azul*) siempre los tienen en una brana. Las que son aros cerrados (*rojo*) están libres de esa restricción.




La teoría de cuerdas también incorpora la teoría de Kaluza-Klein, que representamos de nuevo con una línea del espacio que en realidad es un tubo. Corre a lo largo de este tubo, poblado por cuerdas, una brana unidimensional. Algunas de las cuerdas envuelven la circunferencia del tubo una o más veces. A pocos aumentos, las cuerdas parecen partículas puntuales y la dimensión adicional, incluyendo la brana, no se observa.




DON FOLEY

No podemos estar seguros de cuántos vacíos estables existen, esto es, de cuántos puntos hay en los que una bola quedaría en reposo. Pero muy bien podría resultar que fuera un número enorme. Algunas investigaciones sugieren que hay soluciones con hasta 500 asas, aunque no muchas más. Se pueden enroscar diferentes números de líneas de flujo en torno a cada asa, pero no muchas, porque el espacio se volvería inestable, como la parte de la derecha de la gráfica. Si suponemos que cada asa puede tener entre ninguna y nueve líneas de flujo (10 valores posibles), entonces se darían $10^{500}$ configuraciones posibles. Aun cuando cada asa sólo presentara una unidad de flujo o ninguna, habría $2^{500}$, esto es, $10^{150}$ posibilidades.

No sólo afectan a la energía del vacío las muchas soluciones; cada una de ellas, al definir las clases de partículas y de fuerzas que estarán presentes, y sus masas e intensidades de interacción, dará lugar a diferentes fenómenos en el mundo macroscópico de cuatro dimensiones. La teoría de cuerdas quizá nos proporcione un único conjunto de leyes fundamentales, pero las leyes de la física que observamos en el mundo macroscópico dependerán de la geometría de las dimensiones adicionales.

Muchos abrigan la esperanza de que la física llegue a explicar por qué el universo se rige por las leyes concretas que sabemos obedece. Ahora bien, para que esa esperanza se haga realidad, deben contestarse cuestiones profundas acerca del paisaje de la teoría de cuerdas. ¿Qué vacío estable describe el mundo físico que observamos? ¿Por qué la naturaleza ha escogido este vacío particular y no otro cualquiera? ¿Quedan relegadas a la mera posibilidad matemática todas las demás soluciones? ¿Nunca podrán hacerse realidad? La teoría de cuerdas, de ser cierta, significaría el fracaso absoluto de la democracia: de una copiosa población de mundos posibles, uno y nada más que uno recibiría el privilegio de ser real.

En vez de reducir el paisaje a un único vacío elegido, en el año 2000 propusimos una manera diferente de concebir el problema a partir de dos importantes ideas. La primera: el mundo no tiene por qué quedar atrapado sin remedio en una determinada configuración de las dimensiones pequeñas: un raro proceso cuántico permite que las dimensiones pequeñas salten de una configuración a otra. La segunda: de la teoría general de la relatividad —que está integrada en la de cuerdas— se deduce que el universo puede crecer con tal rapidez, que coexistan diferentes configuraciones unas junto otras en subuniversos distintos, cada uno de ellos tan grande como para no percatarse de la existencia de los demás. Así se suprime el misterio acerca de una existencia única de nuestro vacío particular. Además, planteamos que nuestra propuesta resolvía uno de los mayores enigmas de la naturaleza.

## Un sendero a través del paisaje

Como ya hemos dicho, cada vacío estable se caracteriza por su número de asas, branas y cuantos de flujo. Pero ahora debemos tener en cuenta que cada uno de estos elementos se puede crear y destruir, de modo que tras períodos de estabilidad el mundo puede saltar a otra configuración diferente. En el paisaje, la desaparición de una línea de flujo o un cambio topológico es un salto cuántico sobre un collado para caer en otro valle más profundo.

Por consiguiente, a medida que pasa el tiempo, diferentes vacíos pueden llegar a la existencia. Supongamos que cada una de las 500 asas del ejemplo anterior comienza con nueve unidades de flujo. Una a una, las 4500 unidades de flujo decaerán en una secuencia que se regirá por las predicciones probabilísticas de la teoría cuántica, hasta que la energía almacenada en los flujos se consuma. Se comienza en un elevado valle de montaña y se salta al azar sobre las crestas circundantes, visitando 4500 valles cada vez más profundos. El camino atraviesa un paisaje variado, pero sólo recorremos una minúscula porción de las $10^{500}$ soluciones posibles. La mayoría de los vacíos no llega a conseguir sus 15 minutos de fama.

Pero hemos pasado por alto una parte clave de esta historia: el efecto de la energía del vacío en la evolución seguida por el universo. Los objetos ordinarios —las estrellas, las galaxias— tienden a frenar el universo en expansión e incluso pueden conseguir que se contraiga. Una energía del vacío positiva, sin embargo, actúa a modo de antigravedad: según la ecuación de Einstein, hace que las tres dimensiones que vemos crezcan cada vez más deprisa. Esta rápida expansión tiene un importante y sorprendente efecto cuando las dimensiones ocultas saltan a una nueva configuración.

Recuérdese que en cada punto de nuestro espacio tridimensional se halla un pequeño espacio de seis dimensiones, que a su vez vive en un punto del paisaje. Cuando este espacio pequeño salta a una nueva configuración, el salto no ocurre en todas partes al mismo tiempo. Se produce en un sitio del universo tridimensional; a continuación, se expande velozmente una burbuja de la nueva configuración de baja energía (*véase el recuadro* “El multiverso”). Si las tres dimensiones grandes no se estuvieran expandiendo, esta burbuja en crecimiento acabaría por ocupar todos los puntos del universo. Pero la antigua región también se está expandiendo, y esta expansión bien puede ser más rápida que la de la nueva burbuja.

Todos salen ganando: la antigua y la nueva región aumentan su tamaño. La nueva nunca desbanca completamente a la antigua. Este resultado es posible gracias a la geometría dinámica de Einstein. La relatividad general no es un juego de ganancia nula: el estiramiento del tejido espacial permite crear volumen lo mismo para el antiguo que para el nuevo vacío. Mientras este arreglo actúa, el nuevo vacío envejece. Cuando le llegue el momento de decaer, no desaparecerá sin más, sino que hará germinar una burbuja en crecimiento, ocupada por un vacío con una energía aún menor.

Puesto que la configuración original sigue creciendo, acabará por decaer de nuevo en otro lugar, a otro mínimo cercano del paisaje. El proceso continuará infinitas veces, y los decaimientos sucederán de todas las formas posibles, con regiones muy separadas perdiendo flujo de diferentes asas. De esta manera, cada burbuja albergará muchas nuevas soluciones.

EL ESTADO DEL VACIO

## El espacio oculto

Cualquier solución dada de las ecuaciones de la teoría de cuerdas representa una configuración específica del espacio y del tiempo. En particular, especifica la disposición de las dimensiones pequeñas, así como las de sus branas asociadas (*verde*) y las líneas de fuerza conocidas como líneas de flujo (*naranja*). Nuestro mundo tiene seis dimensiones adicionales, de manera que cada punto de espacio tridimensional esconde un diminuto espacio —o variedad— de seis dimensiones análogas al círculo de que se habla en el recuadro "Dimensiones adicionales". La física que se observa en las tres dimensiones grandes depende del tamaño y de la estructura de la variedad: cuántas "rosquillas" tiene, el número y la colocación de las branas, y el número de líneas de flujo enrolladas en torno a cada rosquilla.

Brana
Línea de flujo
Punto del espacio
Variedad de las dimensiones adicionales
Espacio

DON FOLEY

En vez de una sola secuencia de decaimiento del flujo, el universo experimenta todas las secuencias posibles, lo que resulta en una jerarquía de burbujas anidadas, o subuniversos. El resultado es muy parecido al esquema de inflación eterna propuesto por Alan Guth, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, Alexander Vilenkin, de la Universidad Tufts, y Linde [*véase* "El universo inflacionario autorregenerante", por Andrei Linde; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1995].

Nuestro esquema es análogo a un número infinito de exploradores que tomasen todos los caminos posibles que pasaran por cada mínimo del paisaje. Cada explorador representa algún lugar del universo alejado de los otros. El camino que toma cada explorador es la secuencia de vacíos que experimenta ese lugar del universo. Siempre que el punto de partida de los exploradores se sitúe en las alturas, queda asegurado que se visitarán casi todos los mínimos. De hecho, cada uno será visitado infinitas veces por cada posible camino que baje de los mínimos más altos. La cascada sólo se detiene cuando cae bajo el nivel del mar, en una energía negativa. La geometría característica asociada con una energía del vacío negativa no permite que continúe el juego de la perpetua expansión y formación de burbujas. Hay, por el contrario, una "gran implosión" local, algo similar a lo que ocurre en el interior de un agujero negro.

En cada burbuja, un observador que realizase experimentos a bajas energías (como los únicos que podemos hacer nosotros) vería un universo particular de cuatro dimensiones con sus propias leyes de la física. No puede llegarnos información del exterior de nuestra burbuja, pues el espacio intermedio se expande demasiado deprisa para que la luz pueda adelantarlo. Sólo percibimos un conjunto de leyes, las que corresponden a nuestro vacío local, simplemente porque no vemos muy lejos. En nuestro esquema, lo que tomamos por la gran explosión que creó nuestro universo no es sino el salto más reciente a una nueva configuración de cuerdas en este lugar, que se ha dilatado ya hasta contar con muchos miles de millones de años luz. Algún año, probablemente demasiado lejano como para inquietarse, esta parte del mundo quizás experimente una transición similar.

## La crisis de la energía del vacío

El esquema que hemos expuesto explica cómo llegan a existir los diferentes vacíos estables del paisaje de las cuerdas en diversos lugares del universo, con la consiguiente formación de innumerables subuniversos. Este resultado puede resolver uno de los problemas más importantes y pertinaces de la física teórica, relacionado precisamente con la energía del vacío. Para Einstein, lo que ahora imaginamos como energía del vacío era un término matemático arbitrario —una "constante cosmológica"— que se podía añadir a su ecuación de la relatividad general para que concordase con su convicción de que el universo es estático. Para obtener un universo estático, propuso que esa constante tomara un valor positivo, pero abandonó la idea cuando las observaciones demostraron que el universo se expandía.

Con el advenimiento de la teoría cuántica de campos, el espacio vacío —lo que llamamos aquí simplemente el vacío— se convirtió en un lugar concurrido, lleno de partículas virtuales y de campos brotando y desapareciendo sin cesar, poseyendo cada partícula y cada campo una energía positiva o negativa. Según los cálculos más simples basados en esta teoría, esas energías sumadas alcanzarían la enorme densidad de unos $10^{94}$ gramos por centímetro cúbico, esto es, una

masa de Planck por cada longitud cúbica de Planck. Llamamos a este valor $\Lambda_p$. Un resultado conocido por "la predicción falsa más famosa de la física" porque los experimentos han demostrado tiempo ha que la energía del vacío se encuentra por debajo de $10^{-120}\Lambda_p$. La física teórica se sumió en una profunda crisis.

Entender el origen de esta gran discrepancia ha sido uno de los objetivos principales de la física teórica durante más de tres décadas, pero ninguna de las numerosas propuestas de solución ha gozado de una gran acogida. Con frecuencia se suponía que la energía del vacío es exactamente igual a cero —una suposición razonable para un número que tiene al menos 120 ceros tras la coma decimal—. Así que parecía que la tarea consistía en explicar cómo podía la física dar lugar a un valor nulo. Muchos intentos se centraron en que la energía del vacío pudiese ajustarse por sí misma a cero, pero no se ofrecieron explicaciones convincentes de cómo tenía lugar este ajuste o por qué el resultado final debería aproximarse a cero en todas partes.

Con la intención de aportar un porqué y un cómo, combinamos, en nuestro artículo del año 2000, las soluciones de la teoría de cuerdas y sus dinámicas cosmológicas con una idea enunciada en 1987 por Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin.

Consideremos primero el repertorio de soluciones. La energía del vacío es la elevación vertical de un punto en el paisaje. Esta altura va desde aproximadamente $+\Lambda_p$ en los picos más altos hasta $-\Lambda_p$ en el fondo de los valles más profundos. Suponiendo que existan $10^{500}$ mínimos, sus alturas se distribuirán al azar entre esas dos cotas. Si representamos todos estos valores en el eje vertical, la distancia media entre ellos será de $10^{-500}\Lambda_p$. Muchos, si bien no más que una diminuta fracción del total, tendrán por lo tanto valores entre cero y $10^{-120}\Lambda_p$. Este resultado explica *cómo* aparecen esos valores tan pequeños.

La idea general no es nueva. Andrei Sajarov sugirió ya en 1984 que las complicadas geometrías de las dimensiones ocultas podrían dar lugar a una gama de energías del vacío que incluyesen valores en el rango encontrado experimentalmente. Otros han avanzado propuestas alternativas que no parece que se den en la teoría de cuerdas.

Hemos explicado cómo la cosmología ocupa la mayoría de los mínimos, y que de ahí resulta un complicado universo que contiene burbujas con todos los valores imaginables de la energía del vacío. ¿En cuál de estas burbujas nos encontramos? ¿Por qué debería ser nuestra energía del vacío casi nula? Aquí interviene la intuición de Weinberg. El azar, bien es verdad, tiene algo que ver. Pero muchos lugares son tan inhóspitos que no es extraño que no vivamos en ellos. Esta lógica nos resulta familiar en otro contexto: no nacemos ni en la Antártida, ni en la fosa de las Marianas, ni en las desoladas llanuras sin aire de la Luna. Sólo vivimos en la diminuta fracción del sistema solar que puede acoger la vida. De la misma manera, sólo una pequeña fracción de los vacíos estables puede albergar la vida. Otras regiones del universo con una elevada energía positiva del vacío experimentan expansiones tan virulentas, que la explosión de una supernova palidecería a su lado. Las regiones con gran energía negativa del vacío desaparecen en una implosión cósmica. Si la energía del vacío en nuestra burbuja hubiera sido mayor que $+10^{-118}\Lambda_p$ o menor que $-10^{-120}\Lambda_p$, no podríamos vivir aquí, igual que nos achicharraríamos en Venus o quedaríamos aplastados en Júpiter. Este tipo de razonamiento se denomina antrópico.

Muchísimos mínimos se encontrarán en la franja conveniente, justo por encima o por debajo de la línea de nivel. Vivimos donde se puede vivir, de modo que no debería sorprendernos que la energía del vacío en nuestra burbuja sea diminuta. ¡Pero tampoco sería de esperar que fuera exactamente cero! Unos $10^{380}$ vacíos proporcionan buenas condiciones, pero sólo una pequeña parte, como mucho, tendrá energía nula. Si los vacíos se distribuyen completamente al azar, el 90 por ciento de ellos se encontrarán en el intervalo que va de $0{,}1$ a $1{,}0 \times 10^{-118}\Lambda_p$. De modo que si el cuadro del paisaje es correcto, debería observarse una energía del vacío no nula, probablemente no mucho menor que $10^{-118}\Lambda_p$.

Recientes observaciones de las supernovas distantes han demostrado que la expansión del universo visible se está acelerando; uno de los más sorprendentes giros en la historia de la física experimental, constituye una señal de una energía del vacío positiva. De la tasa de aceleración, se determinó que el valor de la energía era alrededor de $10^{-120}\Lambda_p$, suficientemente pequeña como para eludir la detección en otro tipo de experimentos y suficientemente grande como para que la explicación antrópica sea plausible.

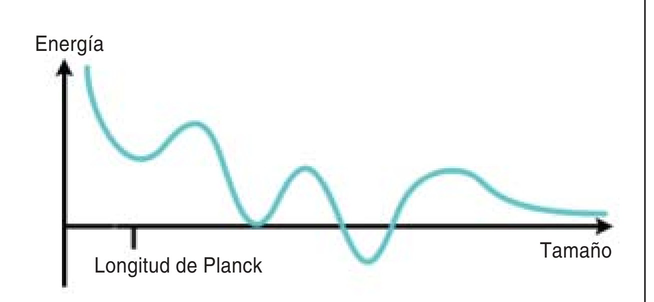
La imagen del paisaje parece resolver la crisis de la energía del vacío, pero con algunas consecuencias inquietantes. Einstein se preguntó si Dios elegía las particularidades de nuestro universo o si, por el contrario, las leyes de éste vienen fijadas por algún principio fundamental. Los físicos tendemos a pensar lo segundo. Las leyes subyacentes de la teoría de cuerdas, aunque no las conocemos aún del todo, parecen ser inevitables y fijas: las matemáticas no dejan elección. Pero las leyes que observamos más directamente no son las leyes subyacentes. Dependen de la forma de las dimensiones ocultas, y en esto las posibilidades son múltiples. Los detalles de lo que vemos en la naturaleza no son inevitables, sino la consecuencia de la burbuja particular en la que nos encontramos.

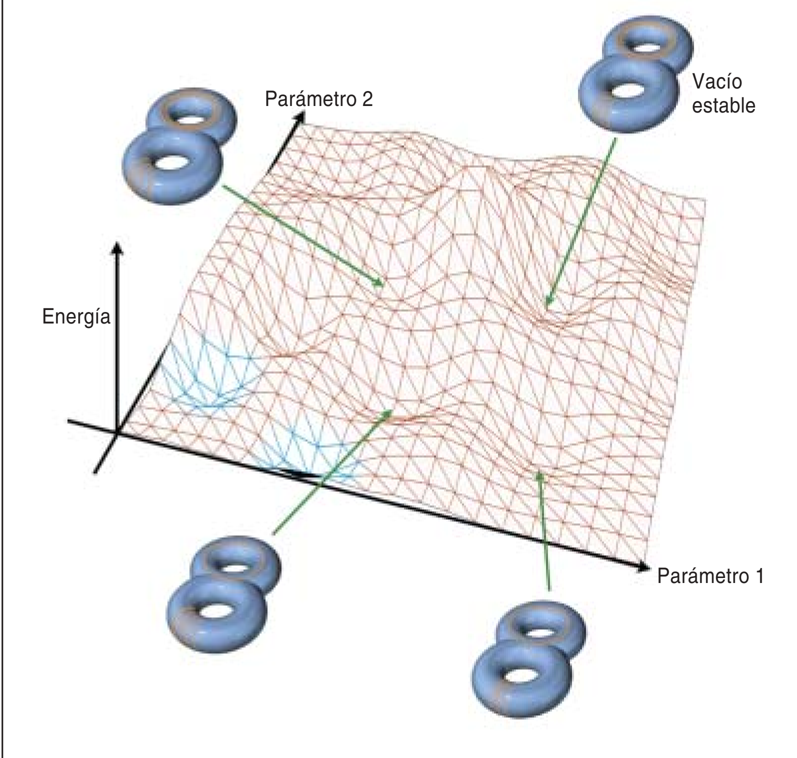
¿Hay alguna otra predicción de la noción de paisaje de cuerdas, aparte de un valor de la energía del vacío pequeño, aunque no nulo? Responder a esta cuestión requeriría un conocimiento mucho mayor del espectro de vacíos. En ello se trabaja activamente desde diversos ángulos. En particular, todavía no se ha localizado un vacío estable específico que reproduzca las leyes de la física conocidas en nuestro espaciotiempo de cuatro dimensiones. El paisaje de las cuerdas es en buena medida un territorio por explorar. Los experimentos podrían ayudar. Puede que lleguemos a ver las leyes de la física de más dimensiones directamente, ya sea mediante cuerdas, agujeros negros o partículas de Kaluza-Klein, gracias a los aceleradores. O incluso se podrían realizar observaciones astronómicas directas de

EL PAISAJE DE LAS CUERDAS

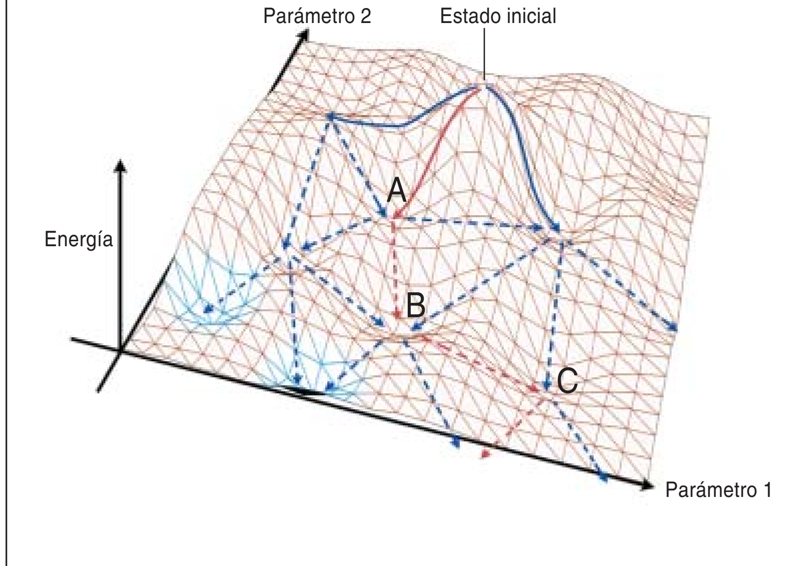
## Topografía de la energía

Cuando se representa la energía de cada posible solución de las cuerdas en función de los parámetros que definen las variedades de seis dimensiones que llevan asociadas, se obtiene un paisaje. Si sólo se varía un parámetro —por poner un caso, el tamaño total de la variedad—, el paisaje es un gráfico simple, una línea. Aquí, tres tamaños en particular (todos cercanos a la longitud de Planck) tienen energías en los valles, o mínimos, de la curva. La variedad tenderá naturalmente a ajustar su tamaño para acabar en uno de los tres mínimos, como una bola que rueda por una pendiente (también podría "rodar" hacia el infinito, en el extremo de la derecha del gráfico de este ejemplo).




El verdadero paisaje de la teoría de cuerdas comprende todos los parámetros; por tanto, daría lugar a una topografía con un número de dimensiones muy elevado. Aquí representamos un paisaje que muestra las variaciones de la energía del vacío cuando se cambian sólo dos parámetros. La variedad que constituyen las dimensiones adicionales tiende a acabar en el fondo de un valle, que es una solución estable de las cuerdas, o en un vacío estable; dicho de otra manera, una variedad en un valle tiende a permanecer en ese estado durante mucho tiempo. Las regiones de color azul tienen una energía inferior a cero.



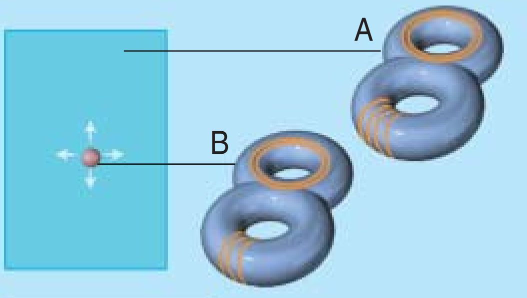

Los efectos cuánticos, sin embargo, permiten que una variedad cambie de estado abruptamente en un punto y, por un túnel, atraviese el collado hasta otro valle vecino. Las flechas rojas muestran cómo podría evolucionar una región del universo: empezando en una cima, rueda valle abajo hasta alcanzar el vacío A, desde donde atraviesa por un túnel hasta otro valle más profundo B, y así sucesivamente. Otras regiones del universo seguirán distintos caminos al azar. Cabe comparar el resultado con un número infinito de exploradores que recorriesen el paisaje y visitaran todos los valles (*flechas azules*).

DON FOLEY

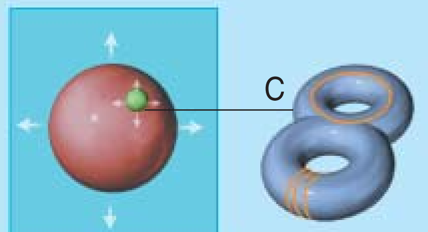
EL MULTIVERSO

## Burbujas de realidad

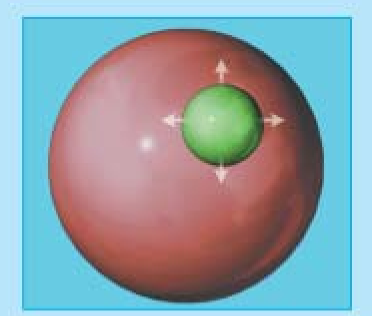
La posibilidad de que un vacío estable se transforme en otro abre un panorama completamente diferente de nuestro universo en las grandes escalas.




El paso por túneles cuánticos de un vacío estable a otro no tiene por qué ocurrir en todas partes del universo al mismo tiempo. Sucederá al azar en uno u otro lugar; se generará así una burbuja de espacio en expansión (*flechas*), con el nuevo vacío. En este ejemplo, la región azul del espacio tiene un vacío A; la variedad constituida por sus dimensiones adicionales pequeñas consiste en dos rosquillas que llevan enrollados grupos de dos y cuatro líneas de flujo. La región roja, que tiene un vacío B, emerge cuando una de las cuatro líneas de flujo decae. En correspondencia con sus diferentes variedades, las dos regiones tendrán diferentes clases de partículas y fuerzas, y por tanto diferentes leyes físicas.



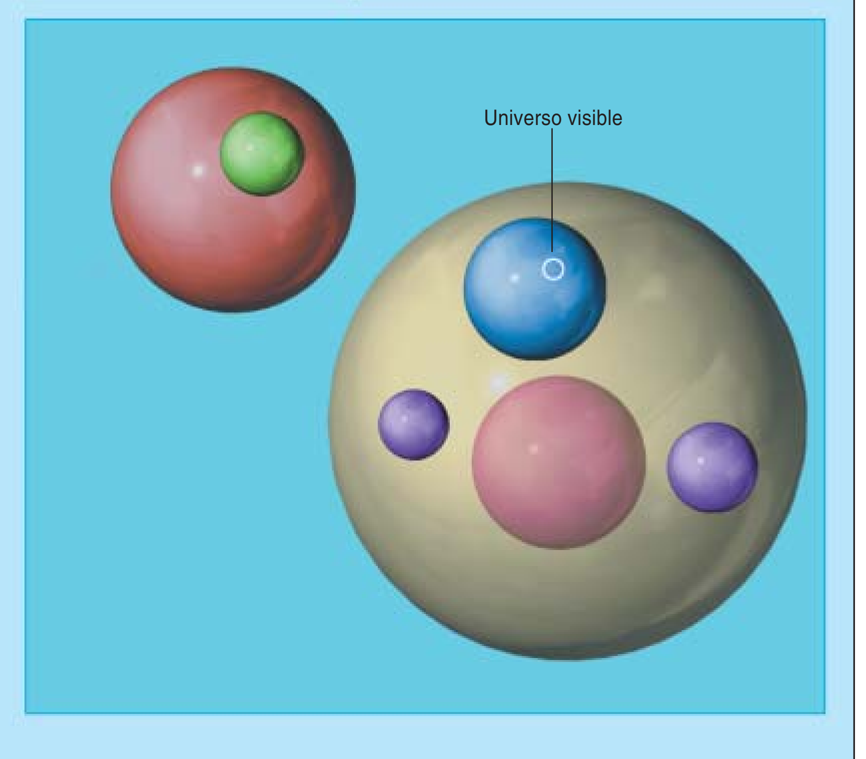

La región roja crece rápidamente, pudiendo llegar a tener un diámetro de miles de millones de años luz. Acabará por haber otra transición en la región roja, esta vez un decaimiento de una de las dos líneas de flujo; generará la región verde, que tiene un vacío C y otro conjunto diferente más de partículas y de fuerzas.



La región verde también crece rápidamente, pero sin llegar a alcanzar a la región roja. De manera similar, la región roja nunca reemplaza por completo el vacío original azul.

Como los túneles cuánticos son cosa del azar, lugares muy separados del universo decaerán siguiendo diferentes series de vacíos. De esta manera, el paisaje se explora completamente; cada vacío estable existe en muchos lugares diferentes del universo.

El universo entero es, por tanto, una espuma de burbujas en expansión dentro de otras burbujas, cada una con sus propias leyes de la física. De entre ellas, son poquísimas las apropiadas para la formación de estructuras complejas, como las galaxias y la vida. Nuestro entero universo visible (de decenas de millones de años luz de diámetro ahora) es una región no muy grande de una de esas burbujas.




DON FOLEY

cuerdas de tamaño cósmico, que podrían haberse producido en la gran explosión para luego expandirse con el resto del universo.

El panorama que hemos expuesto no está firmemente asentado. Desconocemos todavía la formulación precisa de la teoría de cuerdas; al revés que con la relatividad general, para la que tenemos una ecuación precisa basada en un principio físico subyacente que comprendemos bien, las ecuaciones exactas de la teoría de cuerdas son inciertas, y probablemente queden por descubrir nociones físicas importantes, que podrían cambiar por completo o desechar del todo el paisaje de las cuerdas o las cascadas de burbujas que lo pueblan. Del lado experimental, la existencia de una energía del vacío no nula parece ahora una conclusión inevitable de las observaciones, pero los datos de la cosmología se caracterizan por su volatilidad.

Es todavía pronto para dar por terminada la búsqueda de otras explicaciones de la existencia de la energía del vacío y su diminuto valor. Pero no sería menos desatinado descartar la posibilidad de que nos encontremos en un rincón apacible de un universo más variado que todos los paisajes de la Tierra.

## Los autores

**Raphael Bousso y Joseph Polchinski** trabajan juntos desde un congreso sobre la dualidad de las cuerdas en Santa Bárbara (California). Se complementan: Bousso había trabajado en gravedad cuántica y en cosmología inflacionaria y Polchinski, en teoría de cuerdas. Bousso enseña en la Universidad de California en Berkeley. Polchinski es profesor del Instituto Kavli de Física Teórica de la Universidad de California en Santa Bárbara.

## Bibliografía complementaria

EL UNIVERSO ELEGANTE. Brian Greene, Drakontos, 2001.

A FIRST COURSE IN STRING THEORY. Barton Zwiebach. Cambridge University Press, 2004.

THE COSMOLOGICAL CONSTANT PROBLEM. Thomas Banks en *Physics Today*, vol. 57, n.º 3, págs. 46-51; marzo de 2004.

# ¿Estaba Einstein en lo cierto?

**A diferencia de casi todos sus contemporáneos, Einstein creía que la mecánica cuántica cedería el paso a una teoría clásica. Algunos físicos se muestran hoy inclinados a aceptarlo**

George Musser

Einstein se ha convertido en una figura punto menos que intocable. Incluso lo que él reputaba su "pifia monumental" se ha convertido en sólido apuntalamiento del aura de infalibilidad que le rodea. Me refiero a la constante cosmológica, que él mismo introdujo y más tarde repudió: ha resultado ser de gran utilidad para explicar las observaciones astronómicas [*véase* "La constante cosmológica", por Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner, *en este mismo número*]. Los profanos se escandalizan ante la posibilidad de que Einstein no tuviera razón; la mayoría de los físicos teóricos, en cambio, se asombrarían aún más si resultara que andaba en lo cierto.

Al margen de su grandeza, ¿qué le ocurrió a Einstein durante la revolución cuántica de los años veinte y treinta del siglo pasado? Manuales y biografías repiten que se desentendió de la teoría cuántica como el padre que abandona a sus hijos. En 1905 contribuyó a traer al mundo los conceptos básicos, pero a medida que la nueva mecánica maduraba, parece que se limitó a agitar su dedo admonitorio. Se esforzó poco en edificar la teoría y mucho en derribarla. Una suerte de espiritualismo conservador —encarnado en su famosa declaración "nunca creeré que Dios juegue a los dados con el mundo"— pareció eclipsar su racionalidad científica.

Alejado de la corriente cuántica dominante, Einstein dedicó sus últimos decenios a una quijotesca búsqueda de una teoría unificada de la física. Los defensores de la teoría de cuerdas y otros que, andando el tiempo, retomaron esa misma idea unificadora se juramentaron, sin embargo, para no seguir sus pasos. Partieron de un supuesto distinto; a saber: cuando la teoría general de la relatividad (que describe la gravedad) se encuentra con la mecánica cuántica (que se ocupa de todo lo demás), la relatividad debe retirarse. La obra maestra de Einstein, si bien no puede considerarse "errónea" en sentido estricto, acabará revelándose como una mera aproximación.

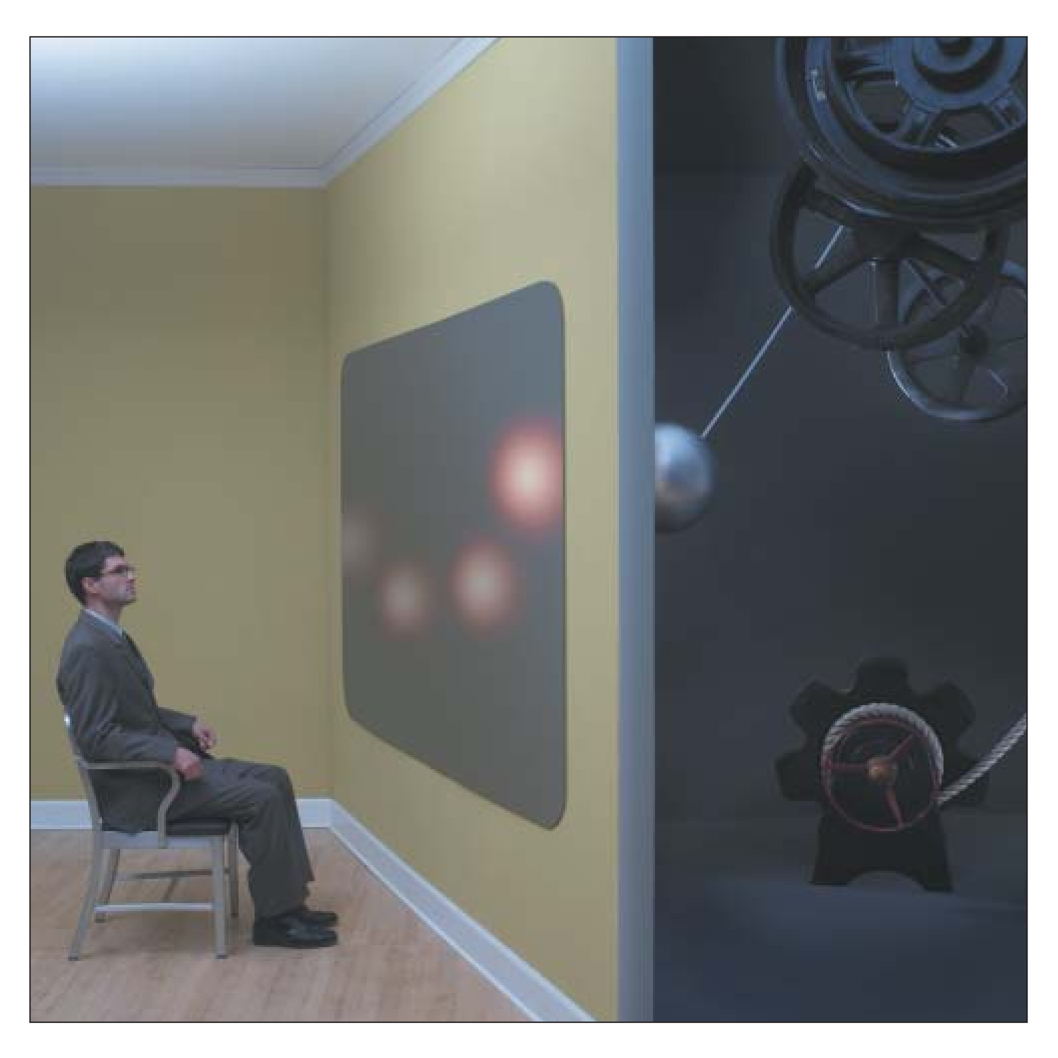
## Teorías incompletas

Pero a medida que los físicos han venido ahondando en la comprensión de la teoría cuántica, la admiración por la postura de Einstein ha multiplicado los adeptos. Según Christopher Fuchs, de los laboratorios Bell, Einstein entendió las cuestiones centrales de la mecánica cuántica con mayor prontitud y profundidad de lo que muchos creen. Algunos incluso coinciden con él en que la teoría cuántica terminará por subsumirse en una teoría más fundamental. Aunque para ello la cuántica deba sufrir algún cambio, si aceptamos el juicio de Raphael Bousso, de la Universidad de California en Berkeley.

¿Una hipótesis aventurada? La mecánica cuántica constituye el marco teórico de mayor éxito de toda la historia de la ciencia. Ha desbancado a todas las teorías clásicas que la precedieron, salvo la relatividad general. Además, los físicos creen, con raras excepciones, que su coronación definitiva es sólo cuestión de tiempo. Y, después de todo, la relatividad está plagada de agujeros, de agujeros negros. Predice que las estrellas colapsan en puntos infinitesimales, pero no acierta a explicar qué pasa luego. Se trata, pues, de una teoría incompleta. Una forma natural de superar sus limitaciones sería subsumirla en una teoría cuántica de la relatividad; la de cuerdas, por ejemplo.

Pero en el país de los cuantos queda también algún cabo suelto. Lo advirtió ya Einstein. La mecánica cuántica no explica por qué ocurren distintos eventos físicos, no brinda una forma de llegar a las propiedades intrínsecas de los objetos y carece de fundamentos

1. ¿SERA LA MECANICA CUANTICA una mera ilusión? Einstein creía que, tras los extraños resultados que se nos ofrecen, se esconde un universo que opera según los principios intuitivos de la física clásica.



DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

conceptuales convincentes. Además, nos retrotrae a una concepción pre-einsteiniana del espacio y el tiempo. La teoría cuántica afirma, por ejemplo, que un cubo de ocho litros contiene ocho veces lo que un cubo de un litro. Ello resulta válido en la vida cotidiana, pero la relatividad nos indica que el cubo de ocho litros puede, en última instancia, dar cabida a sólo cuatro veces aquel contenido; es decir, la verdadera capacidad de los cubos crece en proporción con su superficie y no con su volumen. A esta restricción se la conoce por límite holográfico. Cuando el contenido del cubo alcanza determinada densidad, que se sobrepasa el límite aludido, entonces el sistema colapsa en un agujero negro. Así pues, los agujeros negros podrían constituir un indicio del fracaso no sólo de la relatividad, sino también de la teoría cuántica.

Desde los años veinte, se viene intentando completar la mecánica cuántica con "variables ocultas". En síntesis, la mecánica cuántica procede de la clásica: las partículas cuentan con una posición y velocidad definidas, y obedecen las leyes de Newton (o su extensión relativista); si parecen seguir el ritmo cuántico es simplemente porque no vemos, o no podemos ver, el orden subyacente. En opinión de Carsten van de Bruck, de la Universidad de Sheffield, la aleatoriedad de la mecánica cuántica corresponde a la de lanzar una moneda al aire: parece azar, pero en realidad no hay nada aleatorio; podríamos describir el fenómeno mediante una ecuación determinista.

## Información que se pierde por rozamiento

En el movimiento browniano encontramos una buena analogía. La agitación de las motas de polvo parece aleatoria; sin embargo, como Einstein puso de manifiesto, se debe a unas moléculas invisibles que siguen las leyes clásicas del movimiento. Se trata, en efecto, de una analogía muy sugestiva. Las ecuaciones de la mecánica cuántica presentan una extraña semejanza con las de la teoría cinética molecular y, más en general, con la mecánica estadística. En algunas formulaciones, la constante de Planck, parámetro básico de la teoría cuántica, desempeña, en el sentido matemático, el papel de la temperatura. Viene a ser como si la mecánica cuántica describiese una suerte de gas o conjunto de "moléculas", una caótica sopa de entidades primitivas.

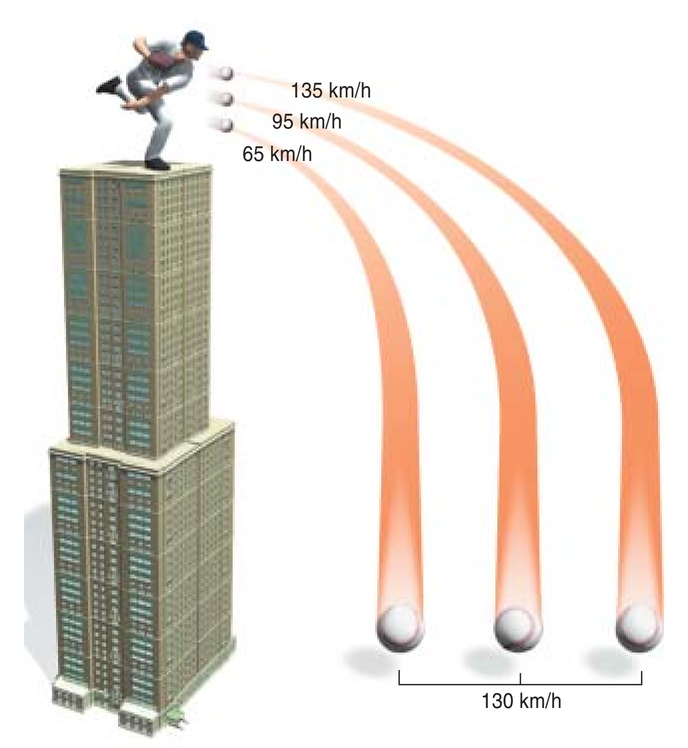
Para evaluar una especulación de este tipo, cuando todavía no cuentan con el conocimiento suficiente para contrastarla empíricamente, los físicos siguen un criterio pragmático: una teoría gozará de mayor aceptación cuanto mayor sea su fecundidad, su capacidad explicativa y predictiva. La de cuerdas, por ejemplo, ha generado nuevos principios físicos y disciplinas matemáticas; por tanto, aunque llegara a fallar experi-

mentalmente, no habría sido una pérdida de tiempo. En ese sentido, hace tiempo que los expertos rechazaron el concepto de variables ocultas. Las teorías que las incorporaron no predijeron ningún fenómeno novedoso, no ofrecieron fundamentos conceptuales convincentes y no consiguieron reproducir la mecánica cuántica sin recurrir a la acción a distancia u otros trucos que se suponía iban a evitar. El mismo Einstein, que al principio se interesó por las variables ocultas, terminó por calificarlas de "chapuza". Llegó a la conclusión de que la teoría cuántica no podía completarse mediante injertos clásicos, sino a partir de un profundo replanteamiento de los fundamentos de la física.

Durante los últimos cinco años, sin embargo, las variables ocultas han resucitado, de la mano de Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht y premio Nobel, conocido por su afición a discurrir sobre hipótesis radicales. Aduce que la diferencia más destacada entre la mecánica cuántica y la clásica yace en la pérdida de información. Un sistema clásico contiene más información que otro cuántico, porque las variables de la física clásica pueden tomar cualquier valor, mientras que las cuánticas sólo determinados, discretos. En consecuencia, para que un sistema clásico dé origen a un sistema cuántico, debe perder información. Eso puede ocurrir mediante el rozamiento u otras fuerzas disipativas.

Si arrojamos dos monedas desde el Empire State con velocidades diferentes, la fricción del aire hará que ambas lleguen al suelo casi con la misma velocidad final. Un observador situado en la acera apenas podrá precisar con qué velocidades se lanzaron; esa información constituye una variable oculta. En esta y muchas otras situaciones, un amplio abanico de condiciones iniciales desembocan, a largo plazo, en las mismas condiciones finales: las del atractor. Igual que de los estados cuánticos, de los atractores se dice también que son discretos. Las leyes que obedecen derivan de las leyes de Newton, aunque difieren de éstas. De hecho, sostiene 't Hoof, no son otras que las de la mecánica cuántica. Según este enfoque, la naturaleza sería clásica en sus niveles más finos, aunque parecería cuántica a causa de la disipación. Massimo Blasone, de la Universidad de Salerno, afirma que la mecánica cuántica podría constituir el límite energético inferior de alguna teoría fundamental.

Dando cuerpo a ese concepto, Blasone ha demostrado que un par de osciladores clásicos plagados de rozamientos dan lugar a un oscilador armónico lineal cuántico (la versión cuantizada del péndulo simple). Cada oscilador obedece las leyes clásicas, pero su comportamiento conjunto sigue los principios cuánticos. El grupo que encabeza Berndt Müller, de la Universidad de Duke, ha demostrado que un sistema clásico que opere en cinco dimensiones puede trocarse en un sistema cuántico si se observa sólo en cuatro dimensiones; el misterio cuántico refleja la rica malla de interconexiones que la dimensión adicional (la variable oculta) ofrece. Respecto al origen del rozamiento que torna en cuánticos los sistemas clásicos, van de Bruck opina que podría tener que ver con la gravedad.




2. EL ROZAMIENTO Y LA PERDIDA DE INFORMACION ofrecen una explicación de la mecánica cuántica en términos clásicos. A causa de la fricción del aire, las pelotas que se arrojan desde lo alto de un rascacielos llegan al suelo con la misma velocidad final. Para un observador situado en la acera, la información relativa a las diferencias entre las velocidades iniciales de las pelotas se pierde. De forma análoga, si el universo sufre algún tipo desconocido de rozamiento, la mecánica cuántica podría reflejar el hecho de que los resultados de los eventos colapsan en valores discretos, en vez de ocupar todo el abanico de posibilidades.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

## Variables que se ocultan en el futuro

Existe otro enfoque para tratar las variables ocultas. Basado también en filigranas dimensionales, reclama la intervención del tiempo. Suele reiterarse, con cierta ironía, que la mecánica cuántica nos resulta tan extraña porque nuestra mente está acostumbrada a pensar que sólo el pasado afecta al presente. ¿Y si influyera el futuro? Entonces, los atributos probabilísticos de la teoría cuántica constituirían sólo un mero reflejo de nuestra ignorancia acerca de lo venidero. Mark Hadley, de la Universidad de Warwick, ha dedicado los últimos diez años a perfilar esa hipótesis. Señala que, en la relatividad general, el futuro existe con la misma certeza que el pasado; por tanto, sería razonable que ambos afectaran al presente. La observación que se efectuaría en el futuro correspondería entonces a una de las variables ocultas.

Yendo más lejos, Haley afirma que la lógica básica de la mecánica cuántica no es más que una consecuencia natural de la teoría de Einstein. También ha recuperado una hipótesis sobre la que Einstein trabajó en los años treinta: las partículas no constituyen objetos instalados en el espaciotiempo, sino partes del mismo. Aunque esta propuesta cayó en desgracia, por-

que, entre otras cosas, no explicaba las simetrías rotacionales de las partículas cuánticas, Hadley asegura haber salvado el problema.

¿Qué hacer, pues, con las hipótesis de 't Hoof y Hadley? Comparadas con intentos precedentes sobre las variables ocultas, ofrecen dos ventajas. Por un lado, resulta difícil representar la conexión entre la realidad cuántica observada y la clásica, más profunda; y a los físicos les gusta que toda teoría que merezca la pena entrañe dificultad. Por otro lado, ambos enfoques predicen nuevos fenómenos, que los físicos experimentales pueden buscar. Por ejemplo, van de Bruck sugiere que los campos gravitatorios intensos podrían cambiar las leyes de la mecánica cuántica.

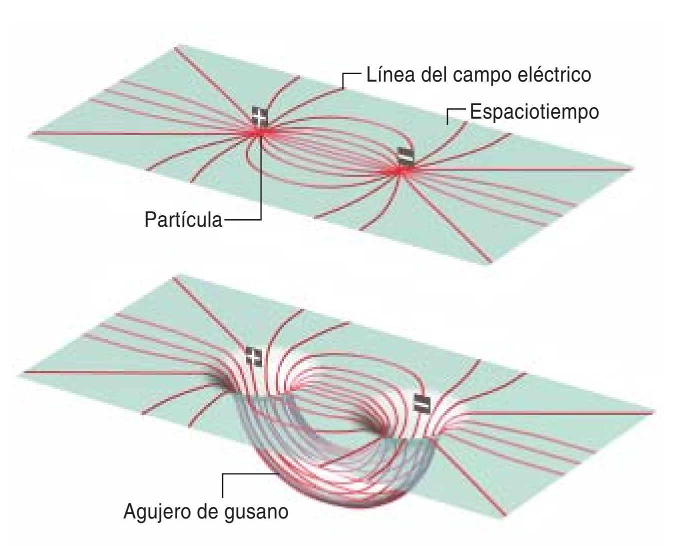
Ideas similares afloran en las teorías dominantes. En la teoría de cuerdas, un sistema cuántico puede ser matemáticamente equivalente, o "dual", a uno clásico. En algunas de esas dualidades intervienen sistemas mecánico-estadísticos similares a los estudiados por Müller. Ningún defensor de la teoría de cuerdas se atrevería a afirmar que el sistema cuántico constituye, literalmente, un sistema clásico; sin embargo, según Brian Greene, de la Universidad de Columbia, la investigación de esas dualidades podría arrojar luz sobre sus diferencias y, por tanto, sobre los principios que subyacen a la teoría cuántica. En cuanto a que ésta pueda surgir de la relatividad, Bousso dedujo, en fecha reciente, el principio de incertidumbre de Heisenberg —la más famosa fórmula de la mecánica cuántica— a partir del límite holográfico.

Con todo, las variables ocultas siguen contando con pocos adeptos entre los físicos. La mecánica cuántica constituye una jungla teórica repleta de entidades extrañas. No parece empeño fácil reducirla a la física clásica. Ahora bien, en vez de aprestarse a reconstruir la teoría partiendo de cero, ¿por qué no desmontarla y averiguar qué es lo que la hace funcionar? Eso es precisamente lo que se propone Fuchs y, con él, otros.

Han descubierto que buena parte de la teoría es subjetiva: no describe las propiedades objetivas de un sistema físico, sino el estado del conocimiento del observador que lo explora. Einstein llegó más o menos a la misma conclusión cuando criticó el concepto de entrelazado cuántico (la misteriosa conexión entre dos partículas remotas). Lo que parece una conexión física corresponde, en realidad, a una imbricación de los conocimientos del propio observador acerca de las dos partículas. Al fin y al cabo, si se diera una conexión real, los ingenieros deberían poder emplearla para enviar señales más rápidas que la luz… pero no pueden. De forma parecida, hace tiempo que los físicos consideran que la medición de un sistema cuántico provoca que éste "colapse" desde un abanico de posibilidades hasta una sola realidad. En opinión de Fuchs, lo que colapsa es precisamente nuestra incertidumbre sobre el sistema.

El truco consiste en despojar al sistema de sus aspectos subjetivos para poner de manifiesto la realidad objetiva. La incertidumbre sobre un sistema cuántico difiere sustantivamente de la que rodea a un sistema clásico. Pensemos en el famoso gato de Schrödinger. Para la física clásica, el gato está vivo o está muerto; la incertidumbre significa aquí que no conocemos su estado hasta que no levantamos la tapa y lo observamos. Para la mecánica cuántica, en cambio, el gato no está ni vivo ni muerto; al mirar dentro de la caja, lo obligamos a convertirse en una cosa u otra, con una probabilidad del 50 por ciento para cada una. A Einstein le pareció una interpretación arbitraria. Las variables ocultas eliminarían esa arbitrariedad.

Pero, ¿del todo? En realidad, el universo clásico no es menos arbitrario que el cuántico. La diferencia reside en el origen de la arbitrariedad. En la física clásica, se remonta al alba del tiempo: una vez que el universo se creó, se representó a sí mismo según un guión previsto. En la mecánica cuántica, el universo improvisa sobre la marcha, en parte mediante la intervención de los observadores. Según Fuchs, no existe una única forma de ser del mundo, porque éste se halla todavía en proceso de creación, de conformación. Lo mismo podría decirse de nuestra interpretación de la realidad cuántica.




BRYAN CHRISTIE DESIGN

3. LOS NUDOS ESPACIOTEMPORALES, o agujeros de gusano, ofrecen otra forma de deducir la mecánica cuántica a partir de una teoría clásica. Las partículas dotadas de carga eléctrica, más que objetos materiales donde se originan las líneas del campo electromagnético (*arriba*), podrían responder a ilusiones causadas por un agujero de gusano (*abajo*).

## Bibliografía complementaria


QUANTUM GRAVITY AS A DISSIPATIVE DETERMINISTIC SYSTEM. Gerard 't Hooft en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 16, n.º 10, págs. 3263-3279; octubre 1999.

DISSIPATION AND QUANTIZATION. Massimo Blasone, Petr Jizba y Giuseppe Vitiello en *Physics Letters A*, vol. 287, n.º 3-4, págs. 205-210; 27 de agosto, 2001.

CHAOTIC QUANTIZATION OF CLASSICAL GAUGE FIELDS. T. S. Biró, S. G. Matinyan y B. Müller en *Foundations of Physics Letters*, vol. 14, n.º 5, págs 471-485; octubre 2001.

FLAT SPACE PHYSICS FROM HOLOGRAPHY. Raphael Bousso en *Journal of High Energy Physics*, mayo 2004.



1. LAS VIOLACIONES DE LA RELATIVIDAD podrían manifestarse en el batido de relojes especulares de antimateria y en la dilatación de la materia en ciertas direcciones.

# Búsqueda de violaciones de la relatividad

**Para descubrir indicios de una teoría unificada que complete la física, se buscan violaciones del principio en que Einstein basó la relatividad**

Alan Kostelecký

La teoría de la relatividad, formulada por Einstein en 1905, cimienta las teorías más fundamentales de la física. Descansa a su vez en una idea: las leyes físicas se presentan bajo la misma forma a todos los observadores inerciales; es decir, a cualquier observador que se mueva a velocidad constante por la dirección que sea. La teoría predice una variedad de fenómenos, entre ellos la igualdad de la velocidad de la luz para todos los observadores, el retraso de los relojes en movimiento y la equivalencia entre masa y energía ($E = mc^2$). Han confirmado estos efectos experimentos de gran sensibilidad. La relatividad es, hoy, una herramienta básica, cotidiana, de la física experimental. En el estudio de los choques entre partículas se constata el aumento de la masa y del tiempo de vida de las partículas rápidas. Los experimentos con isótopos radiactivos dependen de la transformación de la masa en energía. Afecta incluso a la electrónica de consumo: el Sistema de Posicionamiento Global debe tener en cuenta la dilatación del tiempo, que altera la marcha de los relojes a bordo de sus satélites en órbita.

Sin embargo, en años recientes, algunos físicos han venido investigando la posibilidad de que los postulados de la relatividad constituyan sólo una aproximación a los verdaderos principios de la naturaleza. Esperan que pequeñas desviaciones de la relatividad puedan ofrecer las primeras señales de la teoría final buscada tanto tiempo hace.

La invariancia de las leyes físicas para observadores diferentes establece una simetría del espaciotiempo; recibe el nombre de simetría de Lorentz en honor del físico teórico Hendrik Antoon Lorentz, quien la estudió ya a finales del siglo XIX. Una esfera perfecta ilustra una simetría ordinaria, la simetría bajo las rotaciones: la rotemos como queramos, parecerá siempre la misma. La simetría de Lorentz no consiste en que unos objetos presenten el mismo aspecto bajo ciertas transformaciones, sino en la inalterabilidad de las leyes de la física tanto bajo rotaciones como bajo unas determinadas transformaciones que suelen recibir el nombre metafórico de *boosts* (en inglés, empujón hacia arriba, en sentido literal o figurado); a lo largo de este artículo las llamaremos "impulsiones", pero entiéndase que no se trata de algún tipo de proceso físico que modifique el movimiento de entes materiales. Son unas reglas matemáticas que ligan los sistemas de coordenadas que se trasladan a velocidad constante entre sí de manera diferente a como lo hacen las transformaciones galileanas, meramente lineales y aditivas, que aplicamos cuando las velocidades son muy pequeñas con respecto a la de la luz. Cuando se cumple la simetría de Lorentz, el espaciotiempo es isótropo: todas las direcciones y todas las velocidades son equivalentes, ninguna se singulariza.

La simetría de Lorentz forma el núcleo de la relatividad. Las impulsiones producen los bien conocidos efectos relativistas. Antes del artículo de Einstein de 1905, las respectivas ecuaciones habían sido ya estudiadas por otros, Lorentz entre ellos, pero se había interpretado que describían cambios físicos en los objetos; que las longitudes de los enlaces interatómicos, por ejemplo, se acortaban para generar la contracción de las longitudes. Einstein combinó todas las piezas y comprendió que las longitudes y la marcha de los relojes están íntimamente ligadas. Las nociones de espacio y tiempo se fusionaron en un concepto único: el espaciotiempo.

DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

## Relatividad cumplida






b

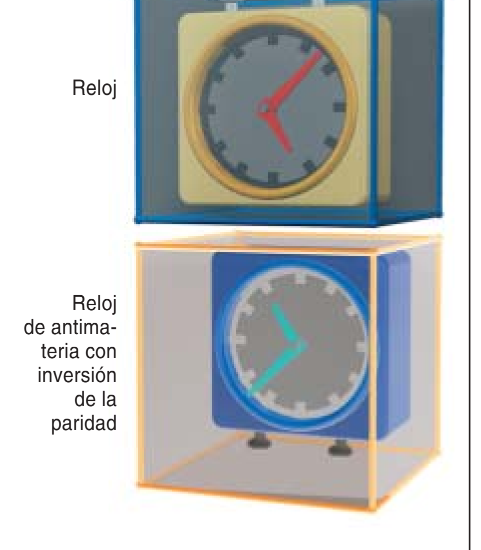


c



La simetría de Lorentz, de capital importancia para la física, es una propiedad fundamental de la naturaleza. Posee dos componentes: la simetría rotacional y la simetría bajo impulsiones, transformaciones que ligan sistemas de referencia que se desplazan entre sí a velocidad constante. Imaginemos dos barras, de materiales disímiles pero de la misma longitud, situadas una junto a otra, y dos relojes movidos por mecanismos distintos que funcionan sincronizados (*a*). Según la simetría rotacional, si rotamos una de las barras y uno de los relojes con respecto a los otros dos objetos, las longitudes de las barras permanecerán iguales y los relojes seguirán sincronizados (*b*). La simetría bajo impulsiones predice que la barra en movimiento se acortará —con respecto a la otra barra, que consideramos en reposo— y que el reloj en movimiento se atrasará; ambos fenómenos se producirán en una cuantía que dependerá de la velocidad relativa de modo exacto (*c*). Cuando el espacio y el tiempo se combinan en el espaciotiempo, la formulación matemática de las impulsiones se parece mucho a la de la simetría rotacional. Una simetría estrechamente relacionada con la lorentziana es la simetría CPT, iniciales tomadas de conjugación de carga, inversión de paridad e inversión del tiempo. Predice que si un reloj se sustituye por otro igual que él pero de antimateria (inversión de carga), invertido además como en un espejo (paridad) y que marche hacia atrás en el tiempo, se seguirá marcando la misma hora (*d*). Un teorema matemático demuestra que, en la teoría cuántica de campos, la simetría CPT debe cumplirse siempre que se obedezca la simetría de Lorentz.

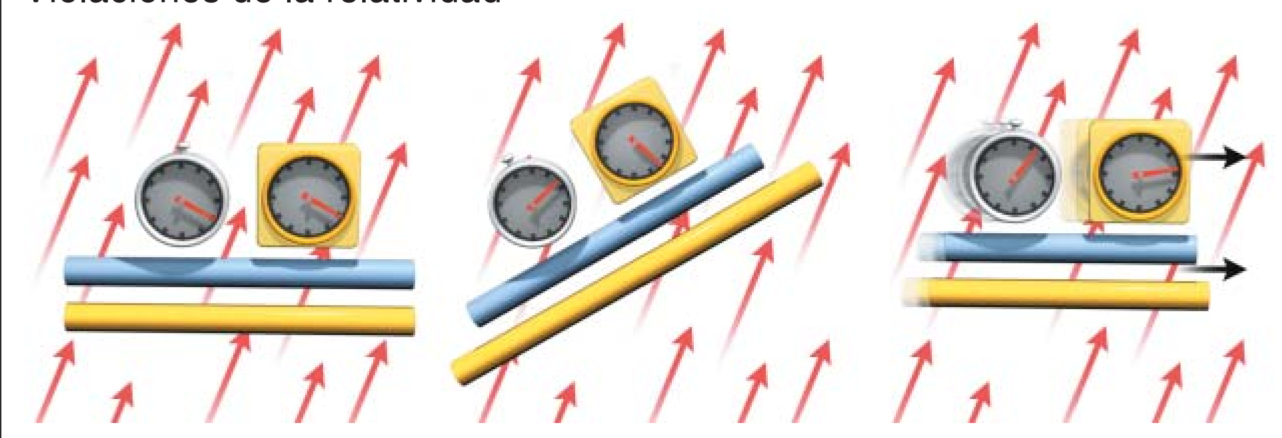
d



Reloj

Reloj de antimateria con inversión de la paridad

## Violaciones de la relatividad

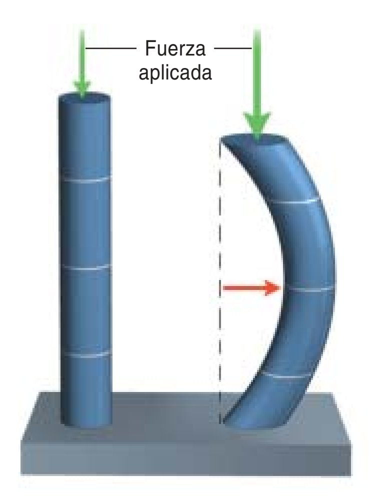


La rotura de la simetría de Lorentz puede representarse mediante un campo de vectores en el espaciotiempo. Partículas y fuerzas interactúan con ese campo de vectores (*flechas*) de modo similar a como interactúan las partículas cargadas con un campo eléctrico (que es también un campo de vectores). A diferencia del caso de la simetría de Lorentz, ya no equivalen todas las direcciones y todas las velocidades. Dos barras de diferente composición que tengan la misma longitud para una orientación relativa al campo de vectores (*izquierda*) quizá se contraigan o dilaten con otra orientación (*derecha*). Análogamente, dos relojes de diferente factura que funcionen acompasados en la primera orientación podrían atrasarse o adelantarse en la segunda. A su vez, barras y relojes que se desplacen a velocidad constante entre sí sufrirían tal vez contracciones de longitud y dilataciones de tiempo diferentes en función de sus materiales, de la dirección de su movimiento y de su velocidad.

DON FOLEY

La simetría de Lorentz se encuentra en las raíces mismas de nuestras teorías de las partículas y fuerzas fundamentales. Combinada con los principios de la mecánica cuántica, crea un armazón para la física: la teoría cuántico-relativista de campos. En ese marco, cada partícula y cada fuerza vienen descritas por un campo que impregna el espaciotiempo y posee la adecuada simetría de Lorentz. Las partículas, así los electrones y los protones, existen como excitaciones localizadas, o cuantos, del campo pertinente. El modelo estándar de la física de partículas, que engloba las partículas y fuerzas no gravitatorias conocidas (la fuerza electromagnética y las interacciones débil y fuerte), es una teoría cuántico-relativista de campos. Los requisitos de la simetría de Lorentz constriñen drásticamente el modo en que los campos de esta teoría pueden comportarse e interactuar. Muchas interacciones, que se expresarían como términos que cabría añadir con apariencia de verosimilitud a las ecuaciones, deben excluirse porque violan la simetría de Lorentz.

El modelo estándar no abarca la interacción gravitatoria. La mejor descripción por ahora de la gravedad, la relatividad general de Einstein, se fundamenta también en la simetría de Lorentz. (El adjetivo "general" significa que incluye la gravedad, mientras que la "relatividad especial" la excluye.) En la relatividad general, las leyes físicas son en cualquier lugar las mismas para todas las orientaciones y velocidades del observador, como antes, pero los efectos de la gravedad complican las comparaciones entre experimentos realizados en lugares distintos. La relatividad general es una teoría clásica (es decir, no cuántica) y se desconoce cómo combinarla con el modelo estándar básico de un modo completamente satisfactorio. Puede combinarse con él de manera parcial, sin embargo, en un "modelo estándar con gravedad", que toma en cuenta todas las partículas y las cuatro fuerzas.




**2. UNA ROTURA ESPONTANEA DE LA SIMETRIA** tiene lugar cuando un conjunto de condiciones o ecuaciones simétricas origina un resultado asimétrico. Piénsese en una barra cilíndrica a la que se aplica una fuerza vertical (*izquierda*). Se trata de un sistema completamente simétrico con respecto a las rotaciones en torno al eje de la barra. Pero si se aplica una fuerza lo bastante grande, el sistema se vuelve inestable y la barra se comba en una u otra dirección (*derecha*). La rotura de la simetría se representa con un vector, o flecha (*en rojo*), que indique la dirección, el sentido y la cuantía de la flexión. La violación de la simetría de Lorentz implica la aparición de este tipo de magnitudes vectoriales en el espaciotiempo.

DON FOLEY

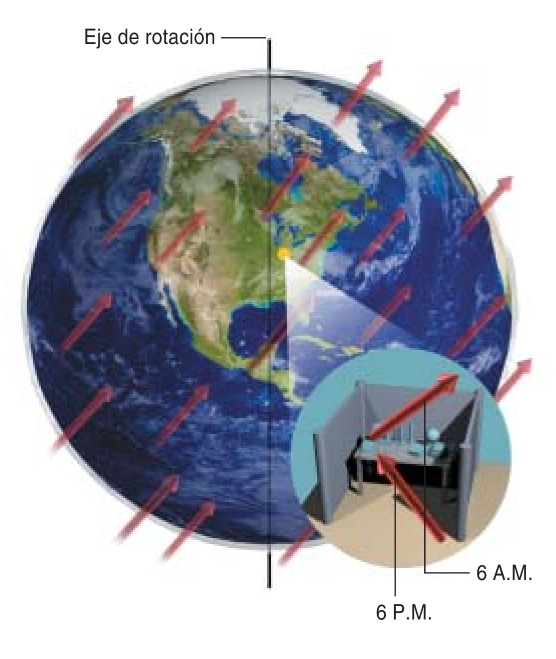
## Unificación y escala de Planck

Esa combinación de modelo estándar y relatividad general resulta asombrosamente acertada en la descripción de la naturaleza. Explica los resultados experimentales y fenómenos fundamentales ya establecidos. No hay pruebas experimentales confirmadas de una física que vaya más allá [*véase* "Más allá del modelo estándar de la física", por Gordon L. Kane; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2003]. Pese a ello, muchos juzgan insatisfactoria la combinación. Una razón de esa inquietud es la incompatibilidad matemática de las elegantes formulaciones de la física cuántica y la gravedad. En situaciones en que aquélla y ésta son importantes —el caso, por ejemplo, de un experimento clásico en el que neutrinos fríos remontan el campo gravitatorio terrestre—, la gravedad se incorpora a la formulación cuántica como una fuerza aplicada desde fuera. Esta caracterización concuerda con el experimento de manera óptima, pero nos deja insatisfechos en cuanto descripción fundamental y coherente. Como si al explicar de qué modo una persona alza un objeto pesado se detallase hasta el nivel molecular la resistencia mecánica y demás propiedades de los huesos, y, en cambio, a los músculos se los tratase sólo como máquinas de funcionamiento desconocido, de las que sólo se supiese que rinden una cierta gama de fuerzas.

Por estas y otras razones, muchos creen que debe ser posible formular una teoría definitiva, una exposición completa y unificada de la naturaleza, que combine sin contradicciones la física cuántica y la gravedad. Uno de los primeros en elaborar este proyecto fue el mismo Einstein. Abordó la tarea durante la última parte de su vida. Quería dar con una teoría que abarcase no sólo la gravedad, sino también el electromagnetismo. Por desgracia, era demasiado pronto. Creemos ahora que el electromagnetismo está estrechamente relacionado con las interacciones fuerte y débil. (La interacción fuerte actúa entre los quarks, que constituyen protones y neutrones; a la débil se deben algunos tipos de radiactividad y la desintegración del neutrón.) Sólo gracias a descubrimientos experimentales realizados tras la muerte de Einstein pudo caracterizarse a ambas interacciones con la nitidez suficiente para entenderlas por separado, no digamos ya para abordar su combinación con el electromagnetismo y la gravedad.


## Resumen

- Aunque la relatividad especial se cuenta entre las más fundamentales y mejor verificadas de las teorías físicas, sus leyes quizá sean violadas, aunque sea en pequeñísimo grado, por la unificación de la mecánica cuántica y la gravedad.
- Para descubrir tales infracciones hay en curso numerosos experimentos, pero hasta ahora ninguno ha sido tan sensible como para lograrlo.




**3. PARA CONSEGUIR UN LABORATORIO QUE GIRE** con respecto a un campo de vectores infractor de la relatividad, presente en todo el espaciotiempo, puede aprovecharse la misma rotación terrestre, como en este experimento hipotético en la Universidad de Indiana (*punto amarillo*). En el referencial del laboratorio, el campo de vectores parece cambiar de dirección en el transcurso de un día. Un experimento detectaría así eventuales violaciones de la simetría de Lorentz; podría consistir en comparar dos masas de distintos materiales, para observar si sufren pequeñas variaciones periódicas.

Una manera de afrontar esa teoría definitiva consiste en la teoría de cuerdas, donde las partículas y fuerzas se describen en función de objetos unidimensionales ("cuerdas") y membranas de dos o más dimensiones que reciben el nombre de branas. La gravedad cuántica de bucles pretende dar con una interpretación cuántica compatible con la relatividad general; predice que el espacio está formado por parches (cuantos) de área y volumen [*véase* "Atomos del espacio y del tiempo", por Lee Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2004].

Como quiera que sea la teoría definitiva, se espera que la física cuántica y la gravedad acaben inextricablemente entrelazadas en una escala de longitud fundamental de unos $10^{-35}$ metros, la longitud de Planck, llamada así en honor de Max Planck, el creador de la noción de cuanto. La longitud de Planck es, con mucho, demasiado pequeña tanto para los microscopios corrientes como para esa otra especie de microscopio que son los colisionadores de partículas de alta energía (que "sólo" llegan hasta unos $10^{-19}$ metros). Construir una teoría definitiva convincente, pues, no sólo presenta grandes dificultades; resulta además imposible observar directamente los nuevos fenómenos físicos que sin duda prediría.

Pese a esos obstáculos, puede que exista una senda que nos lleve a obtener información experimental sobre la escala de Planck. Experimentos de sensibilidad suficiente quizá capten minúsculos efectos indirectos que reflejen la nueva física de la teoría unificada. Como analogía valga la imagen de una pantalla de televisor u ordenador, compuesta de un gran número de píxeles luminosos. Son pequeños respecto a la distancia a que de ordinario se observa la pantalla; la imagen se muestra continua a la vista. Pero en ciertas ocasiones se hacen patentes; por ejemplo, cuando un locutor viste una corbata a rayas estrechas y se ven aguas en la pantalla. Hay violaciones de la relatividad que darían lugar a "efectos muaré" de ese estilo, pero en la escala de Planck. A distancias macroscópicas, el espaciotiempo parece invariante de Lorentz, pero la simetría pudiera romperse a distancias pequeñas en razón de las peculiaridades de la unificación de la física cuántica y la gravedad.

Los efectos observables de las violaciones de la relatividad a escala de Planck posiblemente se hallen en el intervalo de $10^{-34}$ a $10^{-17}$. Para hacernos una idea sobre estos valores, consideremos que el grosor de un cabello humano es del orden de $10^{-30}$ veces la distancia de un extremo a otro del universo observable. Incluso $10^{-17}$ no es más que el cociente del grosor de un cabello y el diámetro de la órbita de Neptuno. Por tanto, para detectar violaciones de la relatividad hay que acometer experimentos de una sensibilidad nunca lograda.

Otra simetría espaciotemporal que podría ser violada es la que recibe el nombre de simetría CPT. Se cumple cuando no afecta a las leyes físicas la aplicación simultánea de tres transformaciones: intercambio de partículas y antipartículas (conjugación de cargas, C), reflexión especular (inversión de la paridad, P) e inversión del tiempo (T). El modelo estándar respeta la simetría CPT, pero las teorías con violaciones de la relatividad podrían quebrantarla.

## Infracciones espontáneas

¿De dónde vendrían, si se presentaran, las violaciones de la relatividad en la teoría definitiva? Un mecanismo natural y elegante es la llamada violación de Lorentz espontánea. Posee semejanzas con las roturas espontáneas de otros tipos de simetrías. Las hay siempre que las leyes físicas subyacentes son simétricas, pero no el sistema real. Para ilustrar la idea de ruptura espontánea de la simetría, consideremos una barra cilíndrica delgada, de pie sobre el suelo (*véase la figura 2*). Imaginemos que se le aplica una fuerza vertical descendente. La situación es del todo simétrica bajo rotaciones en torno al eje de la barra: un cuerpo cilíndrico, una fuerza vertical. Las ecuaciones físicas básicas también presentan simetría bajo rotaciones. Para una intensidad suficiente de la fuerza, sin embargo, la barra se curvará en una dirección particular; se habrá roto espontáneamente la simetría rotacional.

En el caso de las violaciones de la relatividad, en vez de las ecuaciones que describen la barra y la fuerza aplicada tenemos las ecuaciones de la teoría definitiva; en vez de la barra misma, los campos cuánticos de la materia y las fuerzas. La intensidad de fondo natural de esos campos suele ser nula. Pero no en ciertas situaciones. El campo eléctrico posee una dirección (es un vector): en cada lugar del espacio habrá, pues, una dirección especial, singularizada por la del campo eléctrico. Una partícula cargada se acelerará en esa dirección: la simetría rotacional se habrá roto



(y también la simetría ligada a las impulsiones). El mismo razonamiento vale para cualquier campo de "tensores"; un vector es un caso particular de tensor.

Esos campos espontáneos de tensores no aparecen en el modelo estándar, pero algunas teorías fundamentales, incluida la de cuerdas, poseen rasgos que favorecen la rotura espontánea de la simetría lorentziana. Stuart Samuel, del City College de Nueva York, y yo planteamos en 1989 que, en efecto, sí había sitio para ella, con las consiguientes violaciones observables de la relatividad, en la teoría de cuerdas y en las teorías de campos con gravedad. En 1991 amplié la hipótesis con Robertus Potting, de la Universidad del Algarve (Portugal), para incluir las violaciones CPT espontáneas en la teoría de cuerdas. Desde entonces, se han propuesto diversos mecanismos que llevarían a las cuerdas, y a otros enfoques de la gravedad cuántica, a contravenir la relatividad. Si la rotura espontánea de la simetría de Lorentz, o cualesquiera otros mecanismos de rotura, formasen parte de la teoría fundamental definitiva, las correspondientes violaciones de la relatividad brindarían su primera prueba experimental.

## El modelo estándar ampliado

Supongamos que la teoría fundamental de la naturaleza contenga la violación de Lorentz, quizá con violación CPT además. ¿Cómo se manifestaría en los experimentos? ¿Qué relación guardaría con la física conocida? Para responder a estas preguntas, nos gustaría disponer de un marco teórico general que abarcase todos los efectos posibles y se aplicase al análisis de cualquier experimento. Con él calcularíamos parámetros experimentales concretos, compararíamos experimentos diversos y haríamos predicciones acerca de los fenómenos esperables.

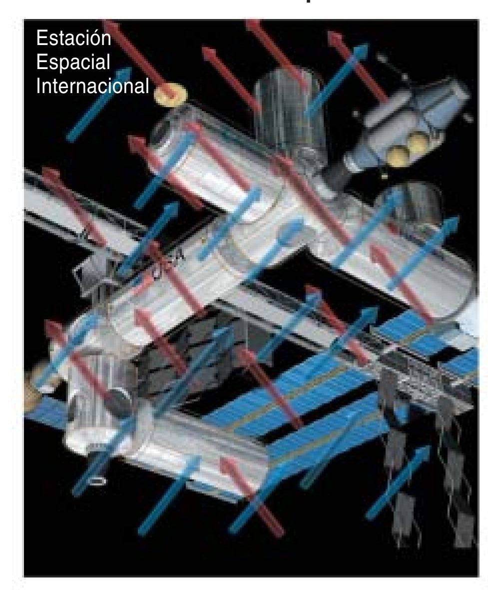
Para construirlo nos guiamos por ciertos criterios. Primero, los fenómenos físicos deben ser independientes del sistema de coordenadas particular empleado para representar el espacio y el tiempo. Segundo, los éxitos experimentales del modelo estándar y la relatividad general significan que las violaciones de Lorentz y CPT han de ser pequeñas. Siguiendo estos criterios y empleando sólo las fuerzas y partículas conocidas, desembocamos en un conjunto de términos posibles —posibles interacciones— que podrían añadirse a las ecuaciones de la teoría. Cada término corresponde a un campo de tensores particular que adquiere un valor de fondo no nulo. Los coeficientes que especifican las cuantías de esos términos se ignoran; muchos podrían ser nulos cuando se conozca la teoría definitiva.

Al resultado final se le ha llamado "ampliación del modelo estándar" (AME). La belleza de esta formulación radica en su generalidad: cualesquiera que sean nuestras preferencias filosóficas o físicas sobre el origen de las violaciones de la relatividad, AME incluirá los efectos resultantes en la naturaleza, pues contiene todas las modificaciones y generalizaciones compatibles con el modelo estándar y lo que sabemos de la gravedad.

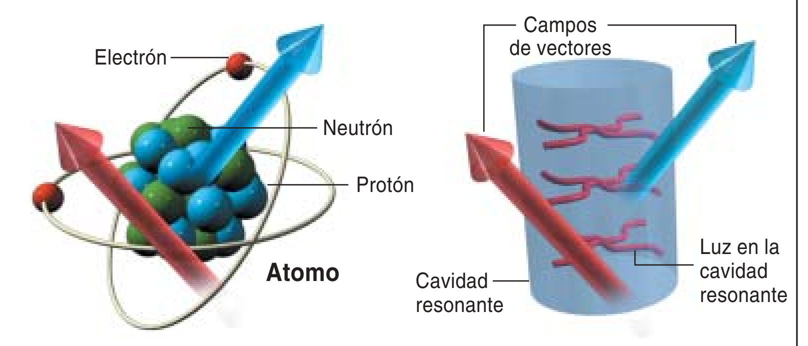
Para imaginar los efectos de la violación de Lorentz, viene bien atribuirle al espaciotiempo una orientación intrínseca. En el caso de un campo vectorial con su correspondiente término en las ecuaciones de AME, esa orientación coincidirá con la dirección que tenga éste. El caso más general, el de un campo de tensores cualquiera, es similar aunque más complicado. En virtud de los acoplamientos con estos campos de fondo, los movimientos y las interacciones de las partículas

LABORATORIOS ORBITALES

### El estudio del espacio en el espacio




En el espacio se buscarán violaciones de la simetría de Lorentz mediante la comparación de relojes. Aquí se representan dos campos de vectores que violan la relatividad (*flechas rojas* y *azules*) y exhiben interacciones diferentes con partículas. Abajo se representa cómo se contrastan un reloj atómico (*representado por un átomo*) y un reloj que funciona con luz o microondas (*líneas onduladas*) encerradas en una cavidad resonante. La luz y los electrones (*en rojo*) interaccionan con los vectores rojos, mientras que los protones (*en azul*) lo hacen con los azules. Con la rotación de la Estación Espacial, esas interacciones cambiantes conducirían a que los relojes se desincronizasen: la violación quedaría de manifiesto. La rotación de 92 minutos de la estación facilita una toma de datos más rápida y más sensible que un experimento en el suelo.




DON FOLEY

## ICONOCLASTAS

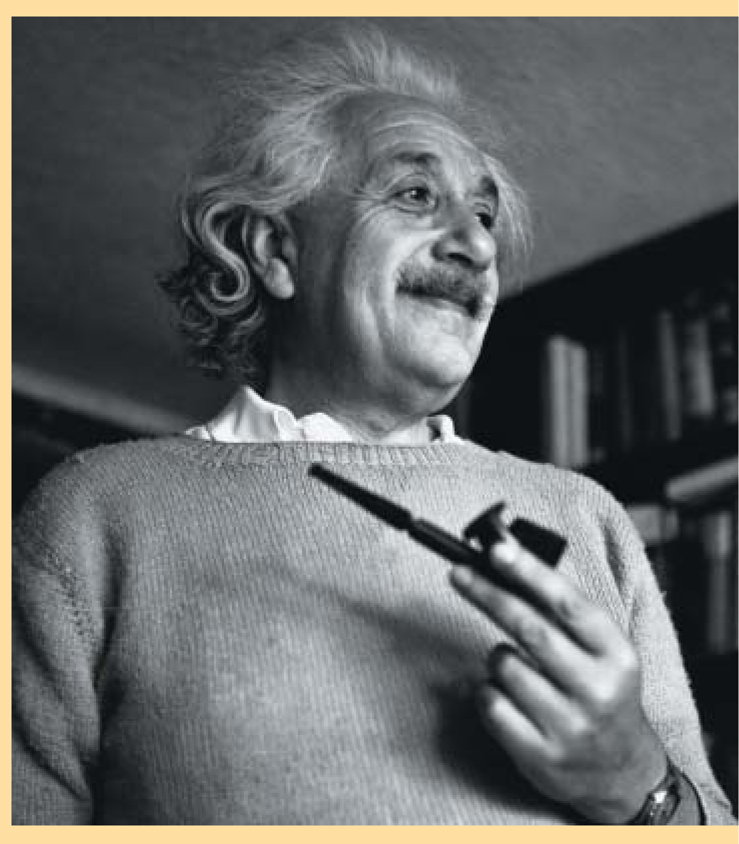
### Derribar a un gigante

Todos quieren un trozo de Einstein. De cada tres manuscritos disparatados que llegan a las revistas científicas, dos se refieren a Einstein: afirman sus autores que disponen de una teoría unificada (acertando donde él fracasó) o que han demostrado la falsedad de sus teorías. (La tercera gran clase de dislates la forman los móviles perpetuos y las fuentes energéticas inagotables.) Cual caníbales ansiosos del vigor y espíritu vital de sus víctimas, tales espontáneos sin norte parecen creer que superando o refutando a Einstein adquirirán todo su prestigio y se les aclamará como a él. Sólo refutan su propia competencia en relatividad básica.

Pero no son los locos los únicos iconoclastas. Numerosos investigadores serios y perfectamente cualificados pretenden también superar a Einstein tal y como éste superó a Galileo y Newton. El artículo de Alan Kostelecký que aquí se ofrece describe la búsqueda experimental de desviaciones de la relatividad einsteiniana. El análisis que expone se basa en una "ampliación del modelo estándar" que añade a las ecuaciones de la física de partículas cualquier término que pueda infringir la relatividad. Se trata de un modelo comprehensivo de todas las desviaciones posibles que, desde las altísimas energías que reinan en las cimas (aún no exploradas) de la teoría unificada definitiva, se filtrarían en la física cotidiana.

No obstante, ciertas enmiendas de la relatividad han atraído en especial la atención; entre ellas, la "relatividad doblemente especial", estudiada por Giovanni Amelino-Camelia, de la Universidad de Roma, desde 2000 y, posteriormente, por Lee Smolin, del Instituto Perímetro de Física Teórica, en Ontario, João Magueijo, del Imperial College de Londres, y otros. Dicho sea de paso, Magueijo encarna a la perfección la figura del "iconoclasta", como se evidencia en su polémico libro *Más deprisa que la luz*.

La relatividad doblemente especial se inspira en la teoría de la gravedad cuántica de bucles [*véase* "Atomos del espacio y del tiempo", por Lee Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2004]. Impone un segundo "limite cinemático", que se une a la barrera relativista de la velocidad de la luz en el vacío, *c*. La idea es que, a distancias muy cortas, la suave continuidad del espaciotiempo debe disgregarse, volverse granulosa, como la arena o la malla de una telaraña. En física cuántica, las distancias y tiempos cortos corresponden a momentos y energías elevados. Así pues, para una energía suficientemente alta —la "energía de Planck"— una partícula debería "ver" la granulosidad del espaciotiempo.



LA GIGANTESCA FIGURA de Einstein proporciona un blanco tentador para físicos de toda índole. Quizá habría visto con buenos ojos los esfuerzos por ir más allá de sus teorías.

Violaría de esa forma la relatividad, para la que el espaciotiempo ha de ser continuo hasta las escalas más diminutas. En una teoría doblemente especial, al igual que una partícula no puede acelerarse por encima de *c*, tampoco llegará a adquirir una energía mayor que la de Planck.

LUCIEN AIGNER *Corbis*

adquirirían una dependencia direccional, como les ocurre a las partículas eléctricas que se mueven en un campo eléctrico o magnético. Cabe imaginar de la misma manera la violación CPT, pero en este caso los correspondientes efectos tendrían lugar porque las partículas y las antipartículas no se acoplarían por igual a los campos de fondo.

AME predice que el comportamiento de una partícula puede quedar afectado de varias formas por las violaciones de la relatividad. Las propiedades e interacciones de la partícula dependerían de la dirección en que se moviese (violaciones de la simetría rotacional) y de su velocidad (violaciones de la simetría bajo impulsiones). Si la partícula tiene espín —un momento angular intrínseco—, la infracción de la relatividad dependerá tal vez del valor y la orientación del espín. O la partícula quizá no sea el reflejo especular de su antipartícula (violaciones CPT). Cada uno de estos comportamientos podría, además, variar según la especie de partícula; los protones a lo mejor estarían más afectados que los neutrones, y no estarlo en absoluto los electrones. Estos efectos se combinarían en una plétora de señales, cuya búsqueda sería el objeto de los experimentos. Algunos ya se han iniciado, pero hasta ahora ninguno ha facilitado pruebas concluyentes de violaciones de la relatividad.

### La luz antigua

El estudio de la luz polarizada que ha viajado miles de millones años luz por el cosmos ofrece un modo de obtener sensibilidades extraordinarias a las violaciones de la relatividad. En la ampliación del modelo estándar, ciertas interacciones que infringen la relatividad cambian la polarización de la luz cuando ésta atraviesa un espacio que está vacío. El cambio sería tanto mayor cuanto más distancia recorriese la luz.

En la AME, las violaciones de la relatividad dominantes que atañen a la luz pueden tanto quebrantar la simetría CPT como preservarla. Se espera que la primera posibilidad, por razones técnicas, no se presente o sólo lo haga en

Algunos de esos modelos predicen que una luz de frecuencia altísima se propaga más deprisa que una de frecuencia más baja. Los experimentadores buscan ese efecto en la que procede de las remotas erupciones de rayos gamma.

Pero los escépticos no están convencidos de que las teorías que se atienen al principio de doble relatividad estén bien cimentadas. Algunos argumentan que sus ecuaciones equivalen físicamente a la relatividad ordinaria, sólo que aderezadas con tantas complejidades, que no resulta evidente. Para afianzarse necesitan una deducción rigurosa a partir de principios más fundamentales, como los de la teoría de cuerdas o la teoría de la gravedad cuántica de bucles, aparte, claro está, de pruebas experimentales. Otra infracción que algunos han considerado es que *c* haya variado a lo largo de la historia del universo (hablando un tanto impropiamente; se trata más bien de que las ecuaciones tomen su forma más natural con *c* variable). John W. Moffat, de la Universidad de Toronto, estudió modelos de ese tipo a principios del decenio de 1990. Magueijo ha sido su paladín más recientemente. Si *c* hubiera sido mayor en los primerísimos instantes de la gran explosión, ciertos efectos se habrían propagado a una velocidad más alta de lo pensado. Despejaría algunos enigmas cosmológicos.

Si *c* varía, variará también alfa, la constante de estructura fina, número adimensional que expresa la intensidad de la interacción electromagnética. Alfa es función de *c*, la constante de Planck y la carga del electrón. Por tanto, aunque *c* no varíe, puede que alfa varíe, lo que podría no violar la relatividad, pero resultaría igualmente un terremoto. La variación de alfa viene en parte avalada por la teoría de cuerdas; su valor dependería de la estructura exacta de las dimensiones adicionales que añade a las cuatro dimensiones ordinarias del espacio y el tiempo.

La posibilidad de que alfa pueda variar ya fue considerada en 1955 por Lev Landau. Hoy, se están examinando luces emitidas por cuásares remotos cuando el universo tenía sólo unos pocos miles de millones de años; se buscan así pruebas de que alfa fue un poco diferente eones atrás. Una alfa variable alteraría la frecuencia de la luz emitida o absorbida por átomos e iones. La mayoría de las búsquedas de esas modificaciones ha resultado infructuosa hasta ahora. Tan sólo el grupo encabezado por John K. Webb, de la Universidad de Nueva Gales del Sur (Australia), ha anunciado un resultado positivo. Emplearon un nuevo procedimiento para afinar la precisión y han presentado pruebas (bien que estadísticamente débiles) de alteraciones de frecuencias: según sus datos, parece que, entre hace ocho mil y once mil millones de años, alfa valía del orden de seis partes por millón menos. Tan minúscula variación es difícil de conciliar con la teoría de cuerdas, que predice la estabilidad a largo plazo de las constantes como alfa, interrumpida por cambios catastróficos de gran magnitud.

Sin embargo, algunos han sostenido que la precisión que declara tener el nuevo método no es correcta; los corrimientos de frecuencias observados no serían más que fluctuaciones estadísticas. Y un equipo formado por Patrick Petitjean y Bastien Aracil, del Instituto de Astrofísica de París, y Raghunathan Srianand y Hum Chand, del Centro Interuniversitario de Astronomía y Astrofísica de Pune (India), no ha podido reproducir en 2004 los resultados de Webb ni con el mismo procedimiento de éste, ni con el tradicional, cuya sensibilidad han apurado al máximo. [Hay que tener en cuenta que la compatibilidad de los datos del grupo franco-indio con que alfa no haya cambiado dependía, cuando utilizaron el método de Webb, de una conjetura acerca de las proporciones entre ciertos isótopos. En cambio, para alcanzar la misma conclusión con el método tradicional mejorado no han tenido que recurrir a suposición alguna acerca de las abundancias isotópicas. Al mismo tiempo, un grupo ítalo-ruso comunicaba también la divergencia de sus resultados con los de Webb. Pero por otra parte ha habido un resultado positivo. Steve Lamoreaux y Justin Torgerson, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, han reanalizado últimamente los datos del reactor natural de Oklo, una veta de uranio que mantuvo espontáneamente durante milenios una reacción de fisión en cadena, hará unos dos mil millones de años. Hasta ahora se consideraba que los datos relativos a este reactor natural sólo imponían una estricta cota superior a una eventual variación de alfa y eran compatibles con su invariabilidad. Según estos investigadores, en cambio, Oklo demostraría que alfa valía más hace dos mil millones de años que ahora (según Webb, recuérdese, valía hace unos diez mil millones de años *menos* que hoy). Este tipo de análisis depende de suposiciones de difícil comprobación; lo sorprendente del resultado mueve a ser cautelosos].

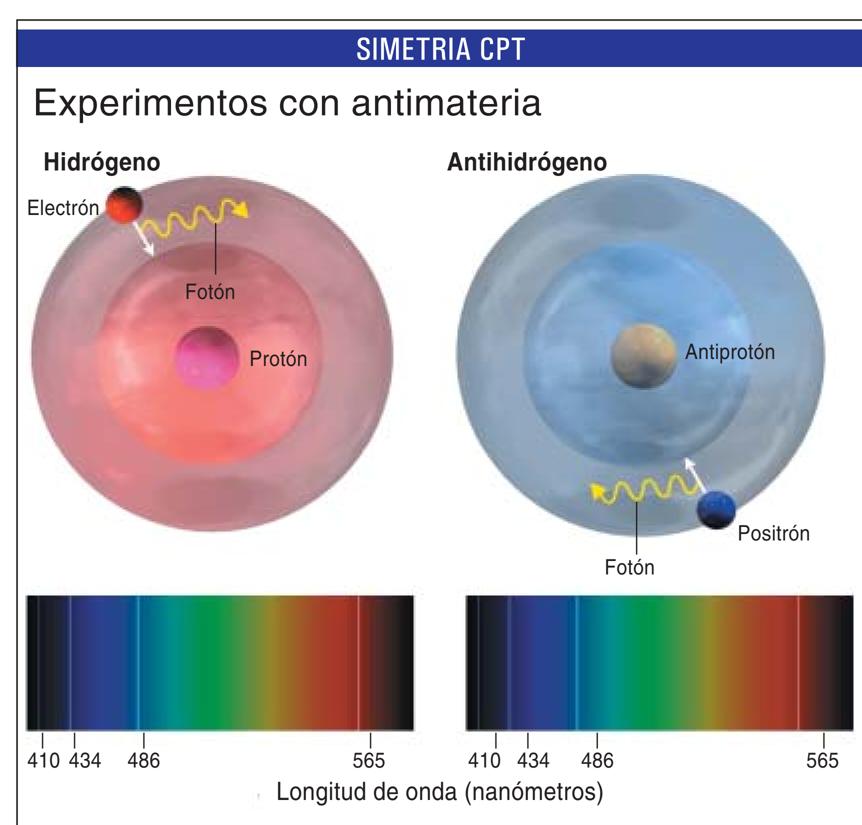
Así que, hasta ahora, Einstein ha resistido a todos sus retadores. Los iconoclastas tendrán que seguir buscando la primera grieta en su armadura. *—Graham P. Collins, de la redacción*

grado insignificante; los datos de los estudios cosmológicos así lo confirman, con una sensibilidad de hasta $10^{-42}$. Alrededor de la mitad de las violaciones de la relatividad que respetan CPT en lo que se refiere a la luz se observarían midiendo la polarización cósmica: el cambio en la polarización de la luz mientras ésta atraviesa el universo dependería de su color. En la Universidad de Indiana, Matthew Mewes y el autor han buscado ese efecto en los datos de la polarización de la luz infrarroja, visible y ultravioleta procedente de galaxias lejanas; hemos alcanzado una sensibilidad de $10^{-32}$ en los coeficientes que controlarían esas violaciones.

Las demás posibles infracciones de la luz a la relatividad pueden medirse en el laboratorio mediante versiones modernas del clásico experimento de Michelson-Morley, en el que se manifestaron los efectos de la simetría de Lorentz (se denomina así en honor del físico Albert Michelson y del químico Edward Morley). En el experimento de Michelson-Morley original se enviaron dos haces de luz en direcciones perpendiculares; resultó que su velocidad era independiente de la dirección. En los experimentos actuales, más sensibles, se emplean cavidades resonantes; se hace, por ejemplo, que giren sobre una plataforma rotatoria y se buscan las variaciones de la frecuencia de resonancia en función del ángulo girado. El grupo de John A. Lipa, de la Universidad de Stanford, emplea cavidades superconductoras para estudiar las propiedades de las resonancias de microondas. Achim Peters, de la Universidad Humboldt de Berlín, Stephan Schiller, de la Universidad de Düsseldorf y sus colaboradores emplean luz láser en resonadores de cristal de zafiro. Estos experimentos y otros similares de diferentes grupos han conseguido sensibilidades de $10^{-15}$ a $10^{-11}$.

## Experimentos de contraste de relojes

También se han conseguido unas sensibilidades excepcionales a las violaciones de la relatividad en ex-




Si se cumple una forma de simetría espaciotemporal denominada invariancia CPT, la antimateria deberá comportarse de igual manera que la materia. Esta hipótesis se está comprobando en el CERN, cerca de Ginebra, con dos experimentos que se valen de átomos de antihidrógeno.

Un átomo de hidrógeno emite luz de un color o longitud de onda característicos cuando su electrón cae desde un nivel energético más alto a uno más bajo (*arriba, izquierda*). Ese mismo proceso en el antihidrógeno (*arriba, derecha*) debe emitir luz del mismo color (los fotones son sus propias antipartículas, así que es también un fotón lo que emiten). Por lo tanto, si se cumple la invariancia CPT, el antihidrógeno y el hidrógeno han de tener unos espectros de emisión iguales (*abajo*). En realidad, en los experimentos del CERN se estudiarán la absorción de luz láser ultravioleta (lo contrario del proceso de emisión aquí mostrado) y transiciones en las que se emiten microondas: en cualquier caso, deberían ser iguales para el hidrógeno y el antihidrógeno. Cualquier discrepancia constituiría una señal de violación CPT, que a su vez implicaría una violación de Lorentz.




perimentos de comparación de relojes, que investigan si el batido de un reloj cambia en función de su orientación. El "reloj" básico por excelencia es un átomo en un campo magnético; su batido, la frecuencia de la transición entre dos de sus niveles energéticos, que depende de la intensidad del campo magnético. La orientación del reloj está definida por la dirección del campo magnético aplicado, fija, de ordinario, con respecto al laboratorio; girará, por lo tanto, con la Tierra. Un segundo reloj monitoriza el batido del primero. Suele consistir en un tipo diferente de átomo, sometido al mismo tipo de transición. Para que la violación se patentice, los batidos (las frecuencias de transición) deben resultar afectados en cuantías distintas.

Hasta ahora, el más sensible experimento de esta clase se ha realizado en el laboratorio de Ronald Walsworth, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. Ha logrado la extraordinaria sensibilidad de $10^{-31}$ a una combinación de coeficientes de AME específica para neutrones. El grupo de Walsworth mezcla helio y neón en una ampolla de vidrio y convierte ambos gases en máseres (láseres de microondas), una difícil proeza técnica. Luego, comparan las frecuencias de los dos máseres.

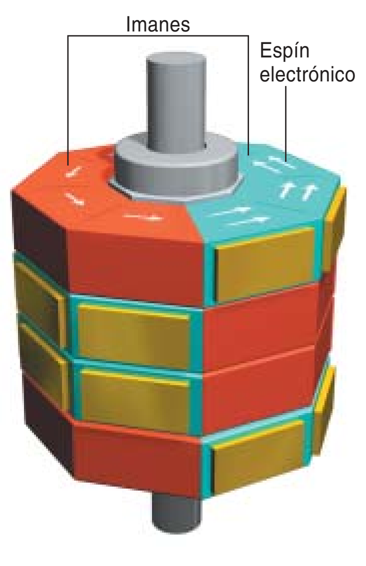
En otras instituciones se han efectuado experimentos de comparación de relojes atómicos con sensibilidades de $10^{-27}$ a $10^{-23}$ a diferentes tipos de violaciones de la relatividad, que afectarían a protones, neutrones y electrones. En otros experimentos se han empleado (en vez de átomos) electrones individuales, positrones (antielectrones), iones de hidrógeno negativamente cargados, antiprotones en trampas electromagnéticas y muonios ("átomos" donde un electrón gira en torno a un muon positivo).

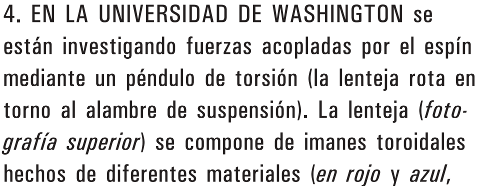
Hay planes para efectuar experimentos con relojes en la Estación Espacial Internacional y en otros satélites. Tendrían varias ventajas, incluido un más fácil acceso a todas las direcciones del espacio. En los experimentos con relojes sobre la superficie terrestre se aprovecha la rotación de la Tierra, pero la inmovilidad del eje de rotación limita la sensibilidad a algunos tipos de violación de la rotación. Como el plano orbital de la Estación se halla inclinado y experimenta precesión, podrían muestrearse todas las direcciones del espacio. Además, el período orbital de 92 minutos de la Estación permitiría una toma de datos 16 veces más rápida que en un experimento terrestre. (La Estación suele dar a la Tierra siempre el mismo lado; para ello, cada 92 minutos no sólo completa una órbita, sino que gira 360 grados alrededor de su eje.)

## Antimateria

Los experimentos que buscan violaciones de la simetría CPT de manera directa comparan las propiedades de partículas y antipartículas. En uno de los ensayos clásicos interviene un tipo de partícula fundamental, el kaón. La interacción débil la convierte gradualmente en su antipartícula, el antikaón, y luego al revés. Es tan fino el equilibrio de estas oscilaciones, que incluso una minúscula violación de la simetría CPT las haría variar perceptiblemente. Diversos grupos buscan violaciones de la simetría CPT en las oscilaciones de los kaones. Por ahora, la cota más sensible de las posibles violaciones CPT y Lorentz la ha logrado la "Colaboración KteV". En ese experimento, el acelerador Tevatrón del Fermilab creó cantidades ingentes de kaones. Los resultados dieron dos mediciones independientes





4. EN LA UNIVERSIDAD DE WASHINGTON se están investigando fuerzas acopladas por el espín mediante un péndulo de torsión (la lenteja rota en torno al alambre de suspensión). La lenteja (*fotografía superior*) se compone de imanes toroidales hechos de diferentes materiales (*en rojo* y *azul*, *derecha*). El campo de cada tipo de imán tiene la misma intensidad, pero está generado por una cantidad diferente de espines electrónicos (*flechas*). El campo magnético forma un lazo cerrado muy débil en el exterior de la lenteja, con lo que se reducen las señales espurias causadas por las interacciones magnéticas. Sin embargo, los espines electrónicos no están compensados. De existir un campo de vectores infractor de la relatividad suficientemente intenso que interaccionase con los espines, se manifestaría perturbando las oscilaciones de la lenteja.

de los coeficientes de AME con una sensibilidad de $10^{-21}$.

En el CERN (el laboratorio europeo de física de partículas cercano a Ginebra) están en curso dos experimentos, ATHENA y ATRAP, para capturar antihidrógeno y comparar sus propiedades espectroscópicas con las del hidrógeno; si se preserva la simetría CPT, habrán de ser iguales a éstas (*véase el recuadro* "Experimentos con antimateria").

En ensayos relativistas de gran sensibilidad se han empleado también objetos de materiales donde los espines de muchos átomos se combinan en un espín global. (Pensemos en el "espín" de cada electrón como si fuera la aguja de una brújula. Las agujas que apuntan en sentidos contrarios se compensan, pero las que marcan un mismo sentido se suman para dar un espín mayor.) Tales materiales son corrientes; el campo magnético de un imán recto se debe a un espín global. En la busca de una violación de Lorentz, la presencia de un campo magnético intenso constituye, sin embargo, un inconveniente. Para obviarlo, Eric Adelberger, Blayne Heckel y sus compañeros de la Universidad de Washington han ideado y construido un anillo de material de espines polarizados que posee un espín electrónico neto pero no un campo magnético externo (*véase la figura 4*). El anillo se emplea como lenteja de un péndulo de torsión, que rota en torno a su cable en un sentido y otro; el armazón de la que pende está sobre una plataforma giratoria. Una violación de Lorentz debida al espín se manifestaría a través de una perturbación de las oscilaciones del péndulo que dependería de la orientación de éste. Este aparato ha establecido en $10^{-29}$ los mejores límites actuales de la violación de la relatividad por los electrones.

Es posible que ya se hayan detectado violaciones de la relatividad, aunque sin reconocerlas como tales. En años recientes, se ha demostrado que los neutrinos, partículas fundamentales que apenas interaccionan con las demás, "oscilan" —unos tipos de neutrinos se convierten en otros—. Obliga a modificar la configuración mínima del modelo estándar [*véase* "La resolución del problema de los neutrinos solares", por Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2003]. Las oscilaciones suelen atribuirse a que los neutrinos posean masas pequeñas, antes desconocidas. Pero AME predice también unas propiedades oscilatorias de los neutrinos insólitas. Han demostrado los teóricos que la descripción del comportamiento de los neutrinos en función de violaciones de la relatividad y de AME puede ser más sencilla que la descripción corriente en función de las masas. Futuros análisis de datos sobre los neutrinos podrían confirmar esta idea.

Los experimentos aquí tratados han puesto de manifiesto que se pueden alcanzar sensibilidades a escala de Planck con las técnicas existentes. Hasta la fecha no han surgido pruebas convincentes de violaciones de la relatividad, pero lo cierto es que no se han estudiado demasiados tipos de violaciones posibles.

TED COOK *Universidad de Washington (fotografía)*; DON FOLEY *(ilustración)*

## El autor

**Alan Kostelecký** es profesor de física en la Universidad de Indiana. Sus investigaciones sobre las simetrías de Lorentz y CPT desencadenaron el reciente interés por las violaciones de la relatividad y han preparado el terreno para un gran número de nuevos experimentos.

## Bibliografía complementaria

TESTING TIMES IN SPACE. Steve K. Lamoreux en *Nature*, vol. 416, págs. 803-804; 25 de abril, 2002.

BACK TO THE FUTURE. Philip Ball en *Nature*, vol. 427, págs. 482-484; 5 de febrero, 2004.

BREAKING LORENTZ SYMMETRY. Robert Bluhm en *Physics World*, vol. 17, n.º 3, págs. 41-46; marzo 2004. Disponible en physicsweb.org/article/world/17/3/7

LORENTZ INVARIANCE ON TRIAL. Maxim Pospelov y Michael Romalis en *Physics Today*, vol. 57, n.º 7, págs. 40-46; julio 2004.

# La unificación de las fuerzas

**En un artículo publicado por *Scientific American* en 1950, esbozaba su teoría unificada de la física. Resultó ser errónea**

George Musser

Cuando Albert Einstein daba los primeros pasos para desarrollar una teoría unificada de la física, en los primeros años veinte, la empresa prometía. La relatividad y una mecánica cuántica en período de gestación planteaban tantas preguntas nuevas cuantas respondían. Ante tal panorama, eran muchos los físicos que percibían la necesidad de un marco conceptual más amplio. Llegaron a raudales ideas nuevas sugeridas por Hermann Weyl, Arthur Stanley Eddington, Theodor Kaluza y otros. Aunque fracasaron en el intento de unificar la física, su empeño sirvió para introducir conceptos harto fecundos; por citar un par: la simetría de aforo y los espacios de dimensión infinita.

Treinta años después, sólo Einstein perseveraba en la tarea. Había publicado un rimero de teorías unificadas, de las que una tras otra se había retractado. Algunos científicos consideraron que su enfoque se encontraba en vía muerta; el progreso que la física ha experimentado desde el fallecimiento de Einstein, en 1955, lo ha confirmado.

A finales de 1949, Einstein publicó la que consideró versión definitiva de su teoría unificada. Los editores de *Scientific American* le invitaron a preparar una adaptación de la misma, en clave divulgativa. El artículo, que se publicaría en el número de abril de 1950, fue el penúltimo de los que Einstein escribiría para el público general. Redactado en alemán, la versión que se publicó corresponde a una traducción apenas retocada por los editores. (El manuscrito original se guarda en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.) Se trata de un texto de ardua lectura. Seco y metódico, carece de los vívidos experimentos ideales que, con trenes, rayos de luz y ascensores, animaban sus anteriores escritos. La descripción de los detalles de la teoría unificada es tan vaga, que resulta casi incomprensible. Dennis Flanagan, editor de la revista en aquel entonces, comenta: "El artículo entrañaba mayor dificultad que los que solíamos publicar; le propusimos al Dr. Einstein algunas modificaciones. No hubo forma".

El artículo ofrece múltiples lecturas, sobre todo, si se toma como una exposición relacionada no con la física sino con la filosofía de la ciencia. Su carácter abstracto, si bien cierra el paso al inexperto, constituye uno de sus rasgos más valiosos, pues refleja la evolución que los intereses de Einstein siguieron en el transcurso de su carrera. Su labor ya no se centraba en explicar los fenómenos observados. La teoría de la relatividad general había dado cuenta de la gravitación; las ecuaciones de Maxwell se encargaban de la otra fuerza prominente de la naturaleza, el electromagnetismo. Movido por la necesidad de eliminar los problemas conceptuales que estas teorías planteaban, Einstein trataba de fundirlas en una.

Así pues, era precisamente la estructura abstracta de estas teorías lo que le interesaba. En el artículo escribía:

> Las teorías nuevas son necesarias, sobre todo, cuando encontramos fenómenos que no pueden "explicarse" mediante las teorías existentes. Pero este pretexto resulta, por así decirlo, trivial, impuesto desde el exterior. Existe otra motivación, más sutil, de no menor importancia: lograr la unificación y la simplificación de las premisas de la teoría como un todo.

Dado que los físicos ya se habían ocupado de resolver las cuestiones más inmediatas y asequibles —habían dado con las leyes que describen nuestras experiencias directas— el siguiente paso entrañaría, sin duda, mayor dificultad:

> Una teoría cuyos conceptos básicos e hipótesis fundamentales se encuentren "próximos a la experiencia" cuenta con una notable ventaja, a la vez que genera una mayor confianza. Además, reduce la probabilidad de tomar una dirección errónea,



AL TRATAR DE ELABORAR una teoría unificada, Einstein trabajó estrechamente con Peter Bergmann (*izquierda*) y Valentine Bergmann (*derecha*), dos jóvenes físicos de origen alemán que también habían huido de los nazis y que más adelante llegarían a adquirir su propia nombradía científica. Sonja, esposa de uno de los Bergmann, fue quien tradujo al inglés el artículo de Einstein para *Scientific American* (y muchos otros manuscritos). Esta fotografía fue tomada en 1940.




puesto que su refutación, mediante experimentos, requiere menos tiempo y esfuerzo. Empero, conforme aumenta la profundidad de nuestro conocimiento, debemos renunciar cada vez más a esta ventaja en pro de nuestra búsqueda de simplicidad y uniformidad lógicas en los fundamentos de la teoría física.

Este razonamiento resulta vigente aún en nuestros días. Son muchos quienes opinan que la teoría de cuerdas, en concreto, se ha desviado tanto de la morada del experimento que ha dejado de constituir una ciencia. Sin embargo, cualquier teoría digna de considerarse fundamental va a parecer remota e inaccesible, al menos de entrada. No basta con efectuar unas cuantas observaciones, seguir una serie de reglas y llegar a una explicación. Debe empezarse por proponer una idea, desarrollarla y, sólo entonces, pensar en cómo verificarla experimentalmente. La ciencia, en este sentido, es un arte. Einstein escribió:

El concepto teórico... no se elabora al margen de la experiencia; tampoco se deduce de la experiencia mediante un procedimiento puramente lógico. Surge de un acto creativo.

En las teorías einsteinianas, la chispa creativa residía en el concepto de simetría. Un objeto se considera simétrico cuando, pese a someterlo a una reflexión, una rotación u otra distorsión, permanece inalterado. Desde el punto de vista matemático, aplicar una transformación de este tipo viene a ser como escribir una ecuación mediante un procesador de textos y luego efectuar una operación de "búsqueda y sustitución" de algunos de sus términos. Si la fórmula cuenta con una determinada clase de simetría, la correspondiente operación de búsqueda y sustitución no alterará su significado.

En el caso de la relatividad especial, las coordenadas que especifican la posición y el tiempo $x$, $y$, $z$ y $t$ pueden sustituirse por una función matemática de $x$, $y$, $z$, $t$. Pero sólo un tipo de función mantiene el significado; de ahí el calificativo de "especial". Esta simetría unifica el espacio con el tiempo. Para calcular la distancia entre puntos, de nada sirve recurrir al teorema de Pitágoras, en el que sólo intervienen $x$, $y$, $z$; se necesita una versión tetradimensional, en la que también aparece $t$.

La teoría de la relatividad general amplía el tipo de operaciones válidas de búsqueda y sustitución. En lugar de una única transformación de $x$, $y$, $z$ y $t$, admite prácticamente cualquier función de estas coordenadas. Para que las ecuaciones de la física permanezcan invariables, se requiere la intervención de una fuerza: la gravitación. La distancia entre puntos se calcula mediante una regla más compleja que el simple teorema de Pitágoras: la "métrica". Esta se representa mediante una matriz cuadrada de $4 \times 4$ números, simétrica respecto de su diagonal principal.

Einstein razonó: ¿Por qué detenerse aquí? ¿Por qué no permitir que esa matriz sea una matriz cualquiera? ¿Por qué no añadir, a la matriz simétrica (con 10 elementos no redundantes), una matriz antisimétrica (con 6 elementos no redundantes)? Se da la circunstancia de que las ecuaciones de Maxwell pueden expresarse mediante una matriz antisimétrica. De aquí la esperanza de unificar la gravitación y el electromagnetismo mediante este enfoque.

Desdichadamente, no todo lo que parece lógico resulta viable. Einstein topó con dificultades al intentar encajar las dos matrices; y no se trataba de un obstáculo transitorio: la gravitación y el electromagnetismo son profundamente dispares. Además, en el transcurso de los tres decenios en los que Einstein estuvo persiguiendo su teoría unificada, se identificaron nuevas fuerzas que no encajaban en su esquema, a saber, las fuerzas nucleares débil y fuerte, más emparentadas con el electromagnetismo que con la gravitación. Aunque la intuición de Einstein sobre el papel de la simetría era correcta, la estaba aplicando en una dirección equivocada. En el artículo escribía:

No veo razón alguna para suponer que el significado heurístico del principio de relatividad general se restrinja a la gravitación y que el resto de la física se trate por separado... La pequeñez, en comparación, de los que hoy denominamos efectos gravitatorios no constituye razón de peso suficiente para ignorar el principio de relatividad general en las investigaciones teóricas fundamentales. En otras palabras, no hay justificación para preguntarse cómo sería la física sin la gravitación.

Resultó que lo cierto era precisamente lo contrario: la mecánica cuántica explica, sin la ayuda de la gravitación y con una precisión exquisita, el electromagnetismo, las fuerzas nucleares y la estructura de la materia. La gravitación constituye la pieza más difícil de encajar con el resto de la física; los expertos están aún en ello.

# Einstein y Newton

## Los dos gigantes de la ciencia compartían genio y figura

Alan Lightman

¿Es posible medir el genio de Albert Einstein? En muchos sentidos, no. Si nos remontamos en el tiempo, pasando por cimas científicas tan señeras como James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann, Charles Darwin, Louis Pasteur o Antoine Lavoisier, debemos retroceder nada menos que hasta Isaac Newton para hallar otro sabio de logro científico comparable. Y anterior a Newton, tal vez no encontremos a nadie.

Einstein y Newton poseían una inteligencia que les permitió abarcar todas las áreas de conocimiento propias de su ámbito y más. Newton inventó el cálculo diferencial, formuló las leyes de la mecánica y del movimiento, y propuso una teoría universal de la gravitación. Einstein creó una nueva teoría de la gravedad y echó los cimientos de las más altas torres de la física moderna: la teoría de relatividad especial y la mecánica cuántica.

Pero ambos científicos fueron más allá de estos hitos cimeros: cambiaron en la ciencia la forma de pensar. Desarrollaron sendas visiones del mundo: el "universo newtoniano" y el "universo einsteiniano"; siendo el primero un mundo de absolutos y el segundo, de relatividades. En el universo de Newton, el tiempo fluye de forma inexorable, a un ritmo constante, ahora y siempre. La causalidad es tan estricta como un mandamiento de Dios. Todo efecto, sin excepción, cuenta con una causa. El futuro puede predecirse, por completo, a partir del pasado. En el universo de Einstein, en cambio, el tiempo no es absoluto: la celeridad del flujo temporal depende del observador. Además, de acuerdo con la física cuántica —que Einstein contribuyó a fundar, a pesar de sus reservas—, la incertidumbre intrínseca a los fenómenos subatómicos impide predecir el futuro a partir del pasado. Las certezas deben reemplazarse por probabilidades.

Encierran estas ideas mayor trascendencia que las propias teorías científicas. Se trata de planteamientos filosóficos, temas sinfónicos que definen distintas formas de entender el mundo.

Newton y Einstein fueron, ante todo, físicos teóricos. Al igual que muchos otros físicos teóricos, realizaron sus trabajos más importantes a la edad de veintitantos años. Ambos probaron suerte con los experimentos. Newton, el gran empirista, descubrió, entre otras cosas, que la luz blanca está compuesta por una mezcla de colores; inventó las matemáticas que hubo menester. No fue éste el caso de Einstein; sin embargo, su brillante intuición le llevó a estudiar y adoptar la obscura geometría no euclídea de Riemann y Gauss, para formular su teoría geométrica de la relatividad.

Ambos pueden considerarse artistas. Se consagraron a la simplicidad, la elegancia y la belleza matemática. Como muchos otros genios, preferían trabajar en solitario. Newton desaparecía durante meses cuando se encontraba sumido en un proyecto. Einstein nunca dirigió tesis doctorales; ejerció la docencia en contadas ocasiones. De los dos, Newton fue el que vivió más apartado, casi aislado, de la sociedad. A su muerte, Voltaire hizo notar que "en el decurso de tan larga vida [Newton] no tuvo ni pasión ni flaqueza; jamás se acercó a ninguna mujer". Newton llegó incluso a formular un plan para preservar su celibato: "La vía que conduce a la castidad", escribió, "no consiste en luchar contra los pensamientos incontinentes, sino en evitarlos mediante alguna ocupación, la lectura o la meditación sobre otras cosas".

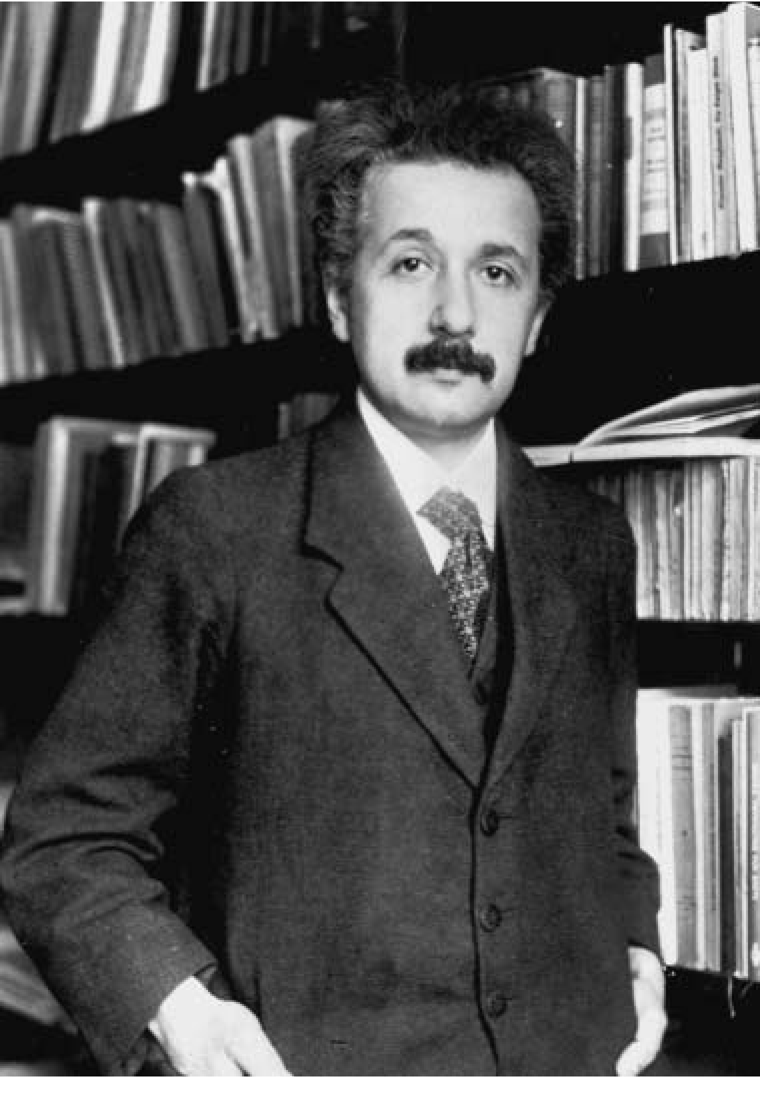
Durante los últimos años de su vida, Einstein se implicó en numerosas causas sociales: ofreció su apoyo a la Liga para los Derechos Humanos, pronunció conferencias sobre política, filosofía o educación por todo el mundo, y contribuyó a fundar la Universidad Hebrea de Jerusalén. Aunque se le conocen varias relaciones amorosas, parece que, en la intimidad, fue tan solitario como Newton. En un ensayo publicado en 1931, a sus 52 años, Einstein escribía:

> Aunque parezca extraño, mi pasión por la justicia y la responsabilidad sociales siempre ha contrastado con una acusada falta de apego a las personas que me rodean y a las comunidades humanas. Me considero verdaderamente un "viajero solitario"; en el fondo de mi corazón, nunca me he sentido parte de mi país, mi hogar, mis amigos y ni siquiera de mi familia más inmediata.

Lo mismo Newton que Einstein defendieron ferozmente su independencia. Ambos adoraban su soledad.

El legado de Isaac Newton y Albert Einstein ha dejado una profunda huella. Newton venció una idea que, durante siglos, había permanecido incardinada en la cultura occidental, a saber, que ciertas áreas de co-

HULTON-DEUTSCH COLLECTION/CORBIS (*arriba*); BETTMANN/CORBIS (*abajo*)





nocimiento son inaccesibles a la mente humana. En gran parte del pensamiento anterior a Newton, a la humanidad sólo le era dado comprender aquello que Dios se había dignado revelar. Adán y Eva fueron expulsados del Paraíso por haber comido del árbol del conocimiento, del conocimiento reservado a Dios. Zeus encadenó a Prometeo a una roca por haber entregado el fuego, un secreto de los dioses, al hombre mortal. Cuando Adán, en el *Paraíso perdido* de John Milton, inquiere al arcángel Rafael sobre la mecánica celeste, Rafael le ofrece sólo vagos indicios y afirma luego que “el resto, al Angel como al Hombre”. Todas estas limitaciones y regiones prohibidas se desvanecieron al llegar Newton con sus monumentales *Principia* (1687). En esa obra exponía, en términos matemáticos y precisos, todos los fenómenos del mundo físico conocido, desde los péndulos y los muelles hasta los cometas y las trayectorias de los planetas. A partir de Newton, la línea que separa lo espiritual de lo material ganó claridad. El mundo físico se presentaba cognoscible a los humanos.

Einstein, con sus extraordinarios y, en apariencia, absurdos postulados de la relatividad especial, demostró que no es posible acceder a las grandes verdades de la naturaleza mediante la mera y minuciosa observación del mundo exterior. Al contrario, en ocasiones los científicos deben partir de sus propias ideas, inventar hipótesis y sistemas lógicos, que sólo más adelante se contrastarán mediante experimentos. Por ejemplo, toda la experiencia que adquirimos desde que nacemos nos hace creer que el tiempo fluye a un ritmo constante; pero se trata de una falsa impresión. La física moderna ha avanzado hasta una comprensión de la naturaleza que trasciende a la experiencia y la percepción humanas; nos ha enseñado que la intuición puede conducirnos a concepciones erróneas. Con su legado, Einstein dio un vuelco al empirismo que, durante siglos, había dominado el pensamiento. Contradijo también el famoso aforismo de Newton *hypotheses non fingo* (“No construyo hipótesis”), con el que el sabio británico afirmaba que no era un filósofo de salón, sino un científico que fundaba sus teorías en fenómenos observables.

En su autobiografía, Einstein se distanciaba de Newton con estas palabras: “Newton, os pido perdón: hallasteis el único medio al que un hombre del más alto intelecto y creatividad podía, en vuestro tiempo, acceder. Los conceptos que introdujisteis siguen todavía hoy guiando nuestro pensamiento en la física, aunque sepamos ahora que deberán reemplazarse por otros más alejados de la esfera de la experiencia inmediata”.

En la introducción de una edición de la *Opticks* de Newton, publicada en 1931, Einstein escribía: “La Naturaleza era para él [Newton] un libro abierto... Conjuntó en su persona el experimentador, el teórico, el mecánico, y, en no menor medida, el artista en la exposición. Permanece ante nosotros recio, seguro y solitario”. Si Newton pudiera reaparecer en el futuro, en un viaje imaginario por el tiempo, probablemente diría lo mismo de Einstein.

---

*Alan Lightman es físico.*

# CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

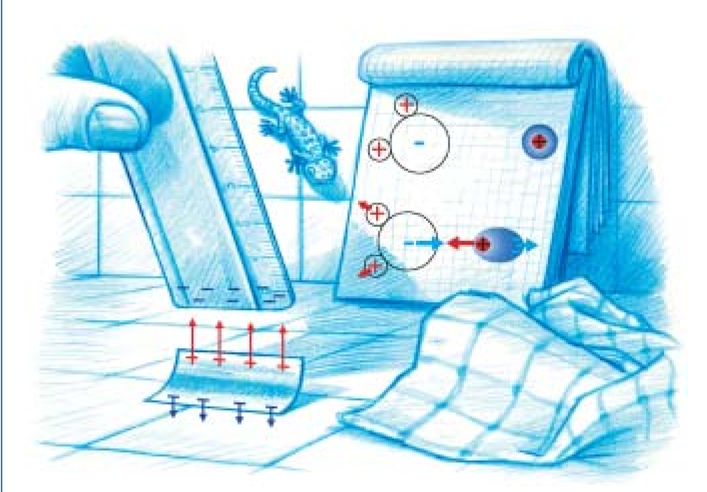
Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

## Interacciones que pegan

Ya en el siglo IV antes de nuestra era, se asombraba Aristóteles de cómo trepaba la salamanquesa por el tronco de los árboles, ora hacia la cima, ora hacia las raíces, incluso cabeza abajo. Hace tiempo que la adherencia de ese lagarto tropical mantiene intrigados a los expertos en reptiles. ¿Tendrá ventosas en las patas? ¿O quizás alguna sustancia pegajosa? Ahora sabemos que es la morfología de las extremidades de ese saurio lo que potencia la interacción entre sus dedos y aquello que toca.

Ya en las postrimerías del siglo XIX, el holandés Johannes Van der Waals presentía que entre las moléculas, aun cuando no estén dotadas de carga eléctrica (neutras), operan ciertas fuerzas. Sus compatriotas Petrus Debye y Wilhelm Keesom, y el germano-estadounidense Fritz London, demostraron que tales interacciones resultan de la polarización de la materia.

Un sencillo experimento sirve para poner de manifiesto dicho fenómeno: frotemos con un trapo de lana una regla de plástico y veremos cómo ésta atrae un trozo de aluminio o de papel. Al arrancar electrones de la lana, el plástico adquiere carga eléctrica negativa. Pero, ¿por qué la hoja de aluminio, siendo éste neutro, resulta atraída? Sucede que, al acercarse la regla, los electrones libres del aluminio (un material conductor) son repelidos; así, éste acumula carga positiva en la zona próxima a la regla y carga negativa en la zona alejada: se "polariza". Puesto que el campo eléctrico que genera la regla decrece con la distancia, mientras la zona del aluminio próxima al punto de contacto (positiva) siente una fuerte atracción, la zona alejada (negativa) percibe una débil repulsión. De este balance resulta, por tanto, una fuerza atractiva y dirigida hacia la región de mayor intensidad de campo.



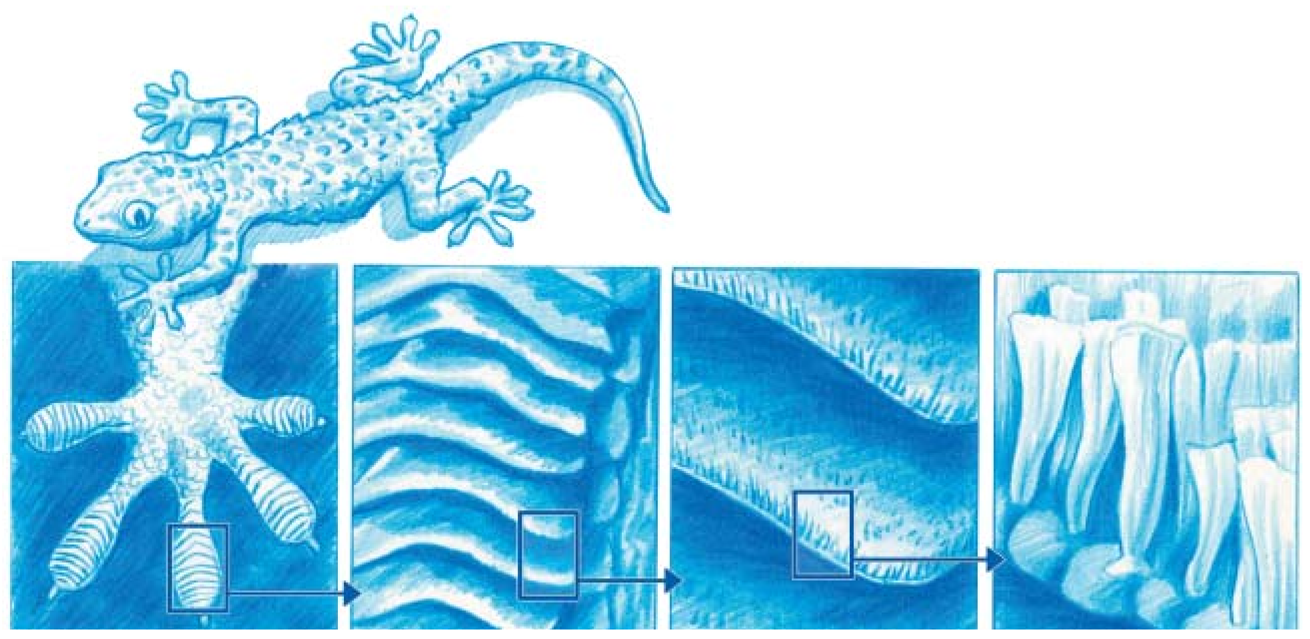
1. La presencia de un campo eléctrico induce la polarización de una hoja de aluminio (*izquierda*), así como de una molécula (*derecha*).

### Polarización de la materia

En el caso del papel, u otro material aislante, ocurre algo parecido. En función de la polaridad de las moléculas, se presentan dos situaciones. Si la distribución de la carga eléctrica es simétrica, nos hallamos ante una molécula apolar, si bien "polarizable": la nube electrónica se desplaza en sentido opuesto al campo, formando un "dipolo inducido". Si la distribución es asimétrica, se trata de una molécula "polar": el campo la hace girar hasta que el dipolo (en este caso permanente) se orienta paralelo a las líneas de fuerza y luego la atrae hacia las regiones de mayor intensidad. La molécula de agua constituye un buen ejemplo de molécula polar: el oxígeno atrae a los electrones que participan en los enlaces que lo unen a los átomos de hidrógeno, de forma que el sistema se comporta como si el oxígeno contara con una pequeña carga negativa y los hidrógenos con la carga opuesta.

Un campo eléctrico actúa sobre una molécula neutra y ésta, a su vez, crea un campo eléctrico. El campo que crean las moléculas polares resulta de la suma de todos los campos asociados a las cargas que, distribuidas de forma asimétrica, polarizan la molécula. En las apolares, como el oxígeno molecular ($O_2$), el origen del campo es más sutil. De acuerdo con la mecánica cuántica, la posición de los electrones en una molécula fluctúa sin cesar. A nuestra escala de tiempo, el conjunto de esos movimientos adquiere la apariencia de una nube de electrones borrosa y simétrica que, en promedio, no genera ningún campo eléctrico. Sin embargo, a la escala de tiempo de los fenómenos subatómicos, el campo eléctrico instantáneo de los dipolos que los electrones (carga negativa) forman con los núcleos (carga positiva) no es nulo. Ese campo actúa sobre las otras moléculas como el de una molécula polar.

Las fuerzas de Van der Waals corresponden, pues, a las fuerzas electrostáticas que operan entre moléculas neutras. Resultan de las interacciones entre los "dipolos inducidos" de las moléculas polarizables y los dipolos permanentes de las moléculas polares. Poco intensas, son siempre atractivas y de corto alcance. Se manifiestan en todo punto de contacto entre objetos, cada vez que una molécula se halla en presencia de otra. En una gran superficie de contacto, la suma de todas las interacciones individuales puede resultar en una fuerza considerable. Por ello cuesta separar




2. Los millones de púas que recubren las patas de la salamanquesa aumentan la superficie de contacto de los dedos con el soporte. Las fuerzas de Van der Waals que allí operan son tan intensas que contrarrestan la acción de la gravedad.

dos placas de acero o vidrio pulidos. Entre dos cuerpos rugosos, en cambio, la adhesión por fuerzas de Van der Waals apenas se manifiesta, pues la superficie de contacto es demasiado pequeña.

Este fenómeno se observa también en las motas de polvo: demasiado ligeras para que su peso las desprenda de una pared, se pegan a los muebles hasta que un plumero las hace volar. Se depositan también en los circuitos integrados, causando graves desperfectos; se han convertido en una de las peores pesadillas de los fabricantes de semiconductores, así como de los ingenieros de la NASA, que no saben cómo eliminar el polvo de los paneles solares de los vehículos de exploración de "Marte el polvoriento".

## La salamanquesa

Por supuesto, una salamanquesa es mucho mayor que una mota de polvo. ¿Cómo explican entonces su adherencia las fuerzas de Van der Waals? Kellar Autumn, profesor de biomecánica de la Universidad de Oregón, y su equipo han resuelto el misterio estudiando la morfología de las extremidades de ese lagarto. Sus cinco dedos en forma de garra están cubiertos de láminas; cada lámina cuenta con numerosas y finas púas —¡500.000 por pata!—, que, a su vez, constan de unas 1000 *spatulae*, cortos filamentos cuya extremidad redondeada es de unas 0,2 micras de ancho. La presencia de tal cantidad de filamentos microscópicos aumenta sobremanera la superficie de contacto entre la salamanquesa y la pared por la que trepa y, por tanto, la fuerza de Van der Waals. Para estimar la magnitud de esa fuerza de adhesión, pensemos en un sistema más simple: por ejemplo, una bola en contacto con una pared. Un cálculo aproximado indica que la fuerza de Van der Waals que opera entre la bola y la pared crece con el radio a razón de 0,2 newton por metro. Si extrapolamos este comportamiento al sistema salamanquesa-pared, la atracción entre cada *spatula* y la pared viene a ser de unos 0,02 micronewton; multipliquémosla por el número de *spatulae* que recubren los dedos del lagarto y obtendremos una fuerza adhesiva de alrededor de 40 newton, suficiente para levantar cuatro kilogramos. Sin embargo, una salamanquesa apenas llega a los 60 gramos.

Merced a unas patas superadherentes y un cuerpo liviano, la salamanquesa sube y baja por las paredes, camina por el techo y se desplaza de hoja en hoja cómodamente. Existe, empero, un material sobre el que, pese a todos sus esfuerzos, resbala: el teflón. Diseñado para impedir que los alimentos se adhieran a la sartén, consiste en un polímero de tetrafluoretileno poco polar y difícilmente polarizable. Sin crear campo eléctrico alguno e insensible al campo de las otras moléculas, las fuerzas de Van der Waals apenas operan en su superficie. Pero, si no se pega ni a los alimentos, ¿cómo logra mantenerse unido al metal de la sartén? Los fabricantes salvan esta dificultad fundiéndolo y depositándolo sobre una superficie metálica muy rugosa. Así, el teflón no se adhiere, sino que se agarra merced al gran número de anfractuosidades que invade —truco que no está al alcance de la salamanquesa.

El ser humano ya ha empezado a remedar este reptil tropical: en iRobot (Massachusetts) están ultimando los detalles de una pata artificial de lagarto, que equipará un robot capaz de desplazarse por las paredes. Con todo, la naturaleza sigue superando la técnica. La pata de una salamanquesa, amén de autoadherente, es autolimpiable. Dejando que el animal caminara sobre talco, los ingenieros han observado que sus patas quedaban limpias a los pocos pasos. Mientras no consigan que las extremidades del robot hagan lo mismo, el polvo amenazará su operatividad.

Juan M.R. Parrondo

# Numerogooglia

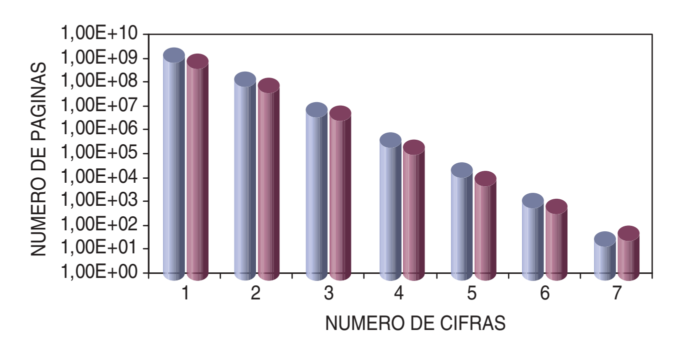
En uno de esos momentos en los que, delante del ordenador, uno no encuentra inspiración por ninguna parte, escribí casi mecánicamente mi número de teléfono en el casillero de Google, el más conocido y eficaz buscador en Internet. Google respondió inmediatamente que había encontrado 31 páginas web en las que aparecía mi número, el 3686105. El resultado me pareció sorprendente. ¿Era mi número de teléfono especial, como para estar contenido en tantas páginas, o estas apariciones eran únicamente fruto de la casualidad?

Google tiene indexadas aproximadamente 6000 millones de páginas. Suponiendo que en todas ellas hubiera un número (y sólo uno) al azar entre 1 y 10.000.000, la probabilidad de que mi teléfono estuviera en una página sería de $10^{-7}$ y el número medio de páginas con mi número sería $6 \times 10^9 \times 10^{-7} = 600$. Este es, por supuesto, un argumento muy grosero: ni todas las páginas contienen un solo número ni todos los números son igual de probables.

¿Podríamos refinar un poco más el argumento? En primer lugar, ¿cuántas páginas web contienen números? Una forma de estimar la fracción de páginas que contienen números, utilizando sólo las funciones de búsqueda de Google, podría ser la siguiente. Buscamos una palabra muy común, como 'the', que se encuentra en 5790 millones de páginas. A continuación buscamos la misma palabra pero eliminando las páginas que contienen '1', '2', '3', etc. Lamentablemente, Google sólo permite un máximo de 10 palabras en sus búsquedas. Por ello, sólo podemos buscar páginas que contengan 'the' (hay que poner un + antes de la palabra para que el buscador la admita) y que no contengan nueve cifras. Haciendo distintas pruebas, vemos que el número de páginas que quedan después de eliminar las que contienen números es, aproximadamente, de 26,6 millones. Esto significa que el 99,54 % de las páginas contienen las primeras cifras. Sin embargo, este método no es fiable y el resultado varía si en lugar de 'the' se utilizan otras palabras.

Por alguna razón que desconozco, el algoritmo de Google para eliminar palabras no conduce a resultados consistentes. Por ejemplo, si buscamos 'time' obtenemos 405 millones de páginas. Buscando 'time –space', es decir, las páginas que contienen la palabra 'time' y que no contienen la palabra 'space', obtenemos 24,5 millones. Finalmente, buscando 'time space', es decir, todas las páginas que contienen las dos palabras, lo que se obtiene es 10,7 millones. Evidentemente, el número de páginas con 'time' y 'space', 10,7 millones, más el número de páginas con 'time' y sin 'space', 24,5 millones, debería ser igual al número de páginas con 'time'. Sin embargo, no llega a la décima parte. Con otros pares de palabras se obtienen resultados similares. De modo que utilizar la opción de eliminar palabras no es nada fiable.

En la segunda parte del argumento inicial, suponíamos que todos los números de menos de siete cifras aparecen por igual. Esta suposición es incorrecta. Los números con menos cifras son evidentemente más comunes. Lo podemos ver buscando en Google mi número de teléfono y quitándole cifras de derecha a izquierda, es decir, buscando 3, 36, 368, 3686, hasta 3.686.105. El resultado puede verse en la figura 1, en donde también he incluido el resultado del mismo experimento realizado con otro número de siete cifras tomado al azar, el 5.477.232. El comportamiento de las dos gráficas, en escala logarítmica, es similar: el logaritmo del número de páginas decrece de manera casi lineal y con una pendiente de 7/6 = 1,17. Esto




**1. Número de páginas, en escala logarítmica, que contienen las primeras cifras de dos números de siete cifras tomados al azar: 3.686.105 (*barras azules*) y 5.477.232 (*barras moradas*).**

quiere decir que, al añadir una cifra, el número de páginas se multiplica aproximadamente por $10^{-7/6} = 0{,}068$. Podemos pensar que este factor es el producto de dos probabilidades: la probabilidad de que en una página aparezca un número con una cifra más, que sería del 68 %, y la probabilidad de que la cifra adicional sea precisamente la de nuestro número, que tendría que estar en torno al 10 %.

Este resultado sí parece consistente y permite obtener la siguiente aproximación para el número de páginas que contienen un número dado de $c$ cifras:

$$N = n_0\,(0{,}068)^{c-1}$$

en donde $n_0$ es el número de páginas que contienen la primera cifra del número. Aunque enseguida veremos un modo de refinar el cálculo de $n_0$, se puede comprobar, buscando páginas que contengan el 1, el 2, etc., que $n_0$ está en torno a los 1000 millones de páginas. Insertando este dato en la fórmula anterior, obtenemos que un número concreto de 7 cifras debería aparecer en unas 100 páginas, uno de 8 cifras en unas 7 y uno de 9 cifras sólo en 0,46 páginas. Se trata, por supuesto, de una aproximación muy grosera,

pero el lector puede comprobar alguna de estas predicciones. Por ejemplo, pruebe a introducir números de ocho cifras y verá que Google encuentra, como mucho, una o dos páginas. Quítele una cifra al número y verá que se encuentran unas pocas decenas, tal y como predice nuestra fórmula.

La aproximación se puede refinar un poco más teniendo en cuenta una vieja y misteriosa amiga: la ley de Benford, a la que dedicamos los *Juegos Matemáticos* de diciembre de 2002. La ley dice que, en un conjunto de datos numéricos que provengan del "mundo real", la probabilidad de que el primer dígito de los datos sea un 1 es mayor que la de que sea un 2, un 3, etc. Con más precisión, la probabilidad de que el primer dígito sea *d* es, según la ley de Benford:

$$P_d = log_{10}\left(1 + \frac{1}{d}\right)$$

Utilizando esta fórmula se encuentra que, para $d = 1$ la probabilidad es, aproximadamente, del 30 %, para $d = 2$ del 17,6 %, para $d = 3$ del 12,5 %, para $d = 4$ del 9,7 %, para $d = 5$ del 7,9 %, para $d = 6$ del 6,7 %, para $d = 7$ del 5,8 %, para $d = 8$ del 5,1 % y para $d = 9$ del 4,6 %. Como vemos, el 1 es más de seis veces más probable que el 9, una diferencia considerable. ¿Se verifica la ley de Benford en Internet?

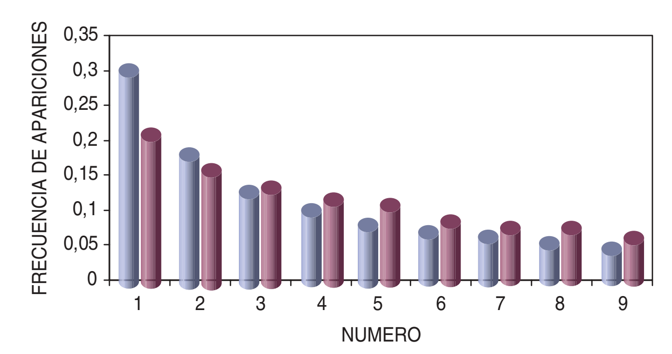
He realizado dos experimentos relacionados con la ley de Benford. En el primero de ellos busco en Google números de sólo una cifra: el 1, el 2, etc., y calculo las frecuencias relativas, es decir, el número de páginas en que aparece un dígito concreto dividido por el número de páginas en donde aparece uno cualquiera de los 9 dígitos. El resultado se muestra en la figura 2 (*barras moradas*) y se compara con la ley de Benford (*barras azules*). El predominio del dígito 1 no es en los datos reales tan grande como el predicho por la ley; sin embargo, la tendencia descendente es clara.

Pero la ley de Benford se aplica al primer dígito de los números y no a las veces que aparecen los dígitos por separado. Un segundo experimento más acorde con el significado de la ley es el siguiente. Tomamos un número de seis cifras al azar y vamos cambiando su primer dígito desde el 1 hasta el 9. Por ejemplo, tomando el 183.954, buscaríamos este número, luego el 283.954, el 383.954, etc. Anotamos los resultados de las búsquedas y calculamos de nuevo las frecuencias relativas. En la figura 3 se ven las frecuencias comparadas con la fórmula de Benford. El acuerdo es mayor que en el caso de la figura 2.

Estamos ahora en condiciones de refinar aún más nuestra fórmula para el número de apariciones, sustituyendo $n_0$ por un número proporcional a la frecuencia dada por la ley de Benford. Con ello, el número de páginas en las que debería aparecer un número de *c* cifras cuya primera cifra es *d* es:

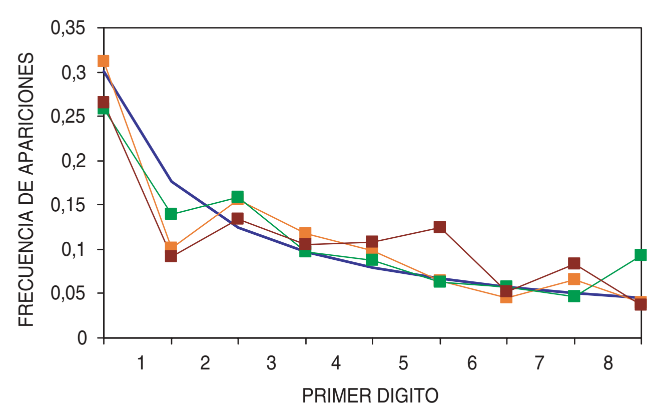
$$N = 45 \times 10^8 \times log_{10}\left(1 + \frac{1}{d}\right) \times (0{,}068)^{c-1}$$

He obtenido el factor $45 \times 10^8$ imponiendo que la suma de páginas para todo valor de *d* y de *c* sea de 10.000 millones, que es un poco superior a la suma de todas las apariciones de números de una cifra (evidentemente, supera el número de páginas indexadas porque en una misma página puede haber varios números). Para un número de 7 cifras comenzando por 1, la fórmula nos da 134 páginas, mientras que para uno que comienza por 3 es sólo de 56 páginas. Jugando con algunos números escritos al azar, se puede comprobar que la fórmula predice aceptablemente los resultados de las búsquedas.




**2. Frecuencia con la que aparecen números de una sola cifra (*barras moradas*) comparada con la ley de Benford (*barras azules*).**

Podemos ahora volver a la pregunta inicial: ¿es mi número de teléfono especialmente frecuente o sus 31 apariciones pueden ser fruto del azar? La fórmula anterior nos dice que un número de 7 cifras comenzando por 3 debería aparecer en unas 56 páginas. Por lo tanto mi número es relativamente raro. Comparen las modestas 31 apariciones con las 199.000 del número de 7 cifras 1.234.567. Este sí es un número peculiar. ¿Podría utilizarse alguna vez Google para cuantificar lo "raro" o lo "familiar" que es un número?




**3. Frecuencia de apariciones cambiando el primer dígito de distintos números de seis cifras, comparada con la ley de Benford (*curva azul*).**

No lo sé, pero creo que Google, además de ser una herramienta insustituible para el internauta, es un estupendo banco de pruebas para jugar con números. Invito al lector a continuar esta *numerogooglia* con sus propios experimentos o juegos. Aquí van algunas preguntas: ¿cuál es el número de 7 cifras con menos apariciones? ¿Cuál es el que aparece más veces? Curiosamente, no es el 1.234.567. He encontrado uno que aparece en más de 600 mil páginas. Imaginen cuál.

parr@seneca.fis.ucm.es

Mark Fischetti

## ORGANOS DE TUBOS

# Aire grande

Los órganos de tubos son los instrumentos musicales más grandes y potentes del mundo. Sin embargo, entre un sonido atronador y un silencio absoluto se interpone sólo una simple placa de madera.

Los órganos han funcionado con la misma física sencilla desde que se construyesen los primeros hacia 250 a.C. El aire, que se bombea desde un depósito, asciende, tras atravesar unas válvulas de madera revestidas de cuero, por tubos de distintas longitudes, donde vibra y produce las diferentes notas. Durante 2000 años, el abastecimiento de aire se conseguía accionando a mano o con los pies unos fuelles —solían encargarse de ello niños—, hasta que aparecieron los motores y soplantes eléctricos.

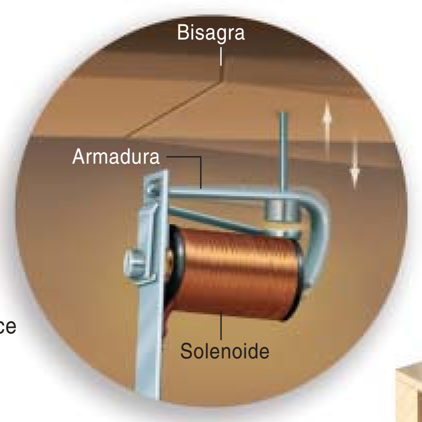
Hasta finales del siglo XIX, cuando un organista oprimía una tecla, unas varillas de madera tiraban de una pequeña placa de madera, la válvula, para permitir el paso del aire al interior de un tubo específico. Pero, conforme el público solicitaba maravillas mecánicas cada vez más aparatosas, iba creciendo la presión del viento necesaria para darles vida y los intérpretes tenían que apretar más y más las teclas para abrir las válvulas venciendo esa presión. Al fin, para resolver el problema, los organeros recurrieron a la recién aparecida electricidad. Ahora, cuando, sin esfuerzo, se oprimía una tecla, se cerraba un circuito que activaba un electroimán o solenoide, que a su vez accionaba directamente la válvula correspondiente.

Actualmente se siguen fabricando órganos con cada uno de esos tipos de "mecanismos". "Hay diferencias en el sonido", dice Stanley Scheer, vicepresidente de Casavant Frères, venerable casa —se fundó en 1879— constructora de órganos establecida en St. Hyacinthe (Quebec). En ciertos diseños, predomina el refinamiento sonoro; en otros, el sentimiento.

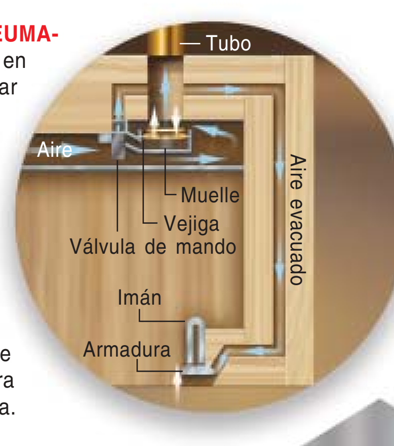
Un órgano de iglesia modesto, de dos teclados, pedales y unos 16 registros (sonoridades distintas) puede tener 1200 tubos y costar unos 150.000 euros; se tardará un par de años en construirlo a mano. En el taller se monta y se prueba completamente; entonces lo desarman y remiten a su lugar de instalación definitiva. Allí, a lo largo de varias semanas, vuelve a montarse la miríada de piezas en un intrincado rompecabezas. Se dan pequeños retoques a cada tubo para ajustarlo a la acústica del local y se los afina. "Cada órgano es una maravilla de la técnica", dice Scheer. Y cada vez que un órgano se toca en público por primera vez, añade, "nos asombra que esa maravilla acabe convirtiéndose en música".

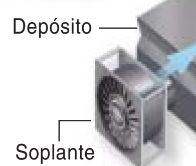
**1. LOS ORGANOS MECANICOS** funcionan con el aire que un fuelle envía a un depósito que regula la presión en el secreto. Cuando el organista tira de un registro, un mecanismo articulado desplaza una corredera de madera cuyos orificios se enfrentan a unos tubos dispuestos en fila y que, así, quedan preparados para emitir sonido. Al oprimirse una tecla, las varillas abren la válvula de madera, permitiendo la entrada de aire al canal de la nota correspondiente (La bemol, por ejemplo), desde donde asciende por todos los tubos cuyos registros estén abiertos.

**2. LOS ORGANOS ELECTROMECANICOS** carecen de varillas. Al oprimirse una tecla, un hilo lleva corriente a un solenoide, que tira de la armadura y abre la válvula, permitiendo el paso de aire al canal correspondiente a la tecla. La válvula se cierra con un muelle (no aparece en la ilustración).




**3. LOS ORGANOS ELECTRONEUMATICOS** basan su funcionamiento en presiones de aire relativas. Al tirar de un registro, se retira una válvula de mando y se abre el conducto hacia un pequeño disco de fieltro (la válvula, en este caso) situado encima de una vejiga de cuero con tensor de muelle. Al oprimir una tecla, llega corriente a un electroimán, el cual abre una armadura, con lo que el aire del conducto sale e impulsa la vejiga hacia abajo para que el aire pueda fluir tubo arriba.



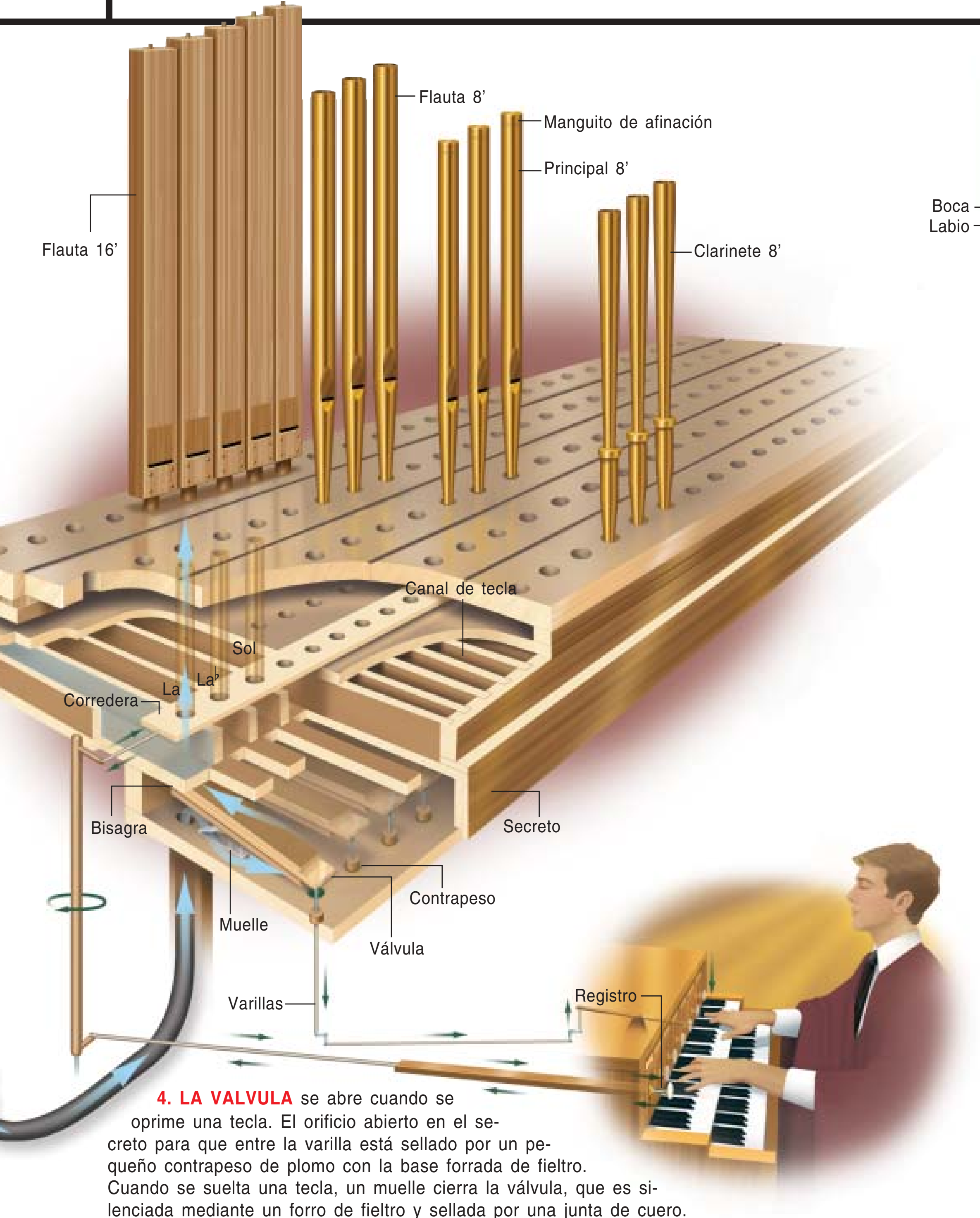




KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

➤ **SONIDO METALICO:** Para los tubos de mayor tamaño, que emiten los bajos, se emplea madera, porque aumenta la resonancia a la vez que atenúa los armónicos. En los tubos metálicos, con más plomo se favorece la nota fundamental; con más estaño se consiguen mayores armónicos. Pueden también emplearse zinc y cobre. En el timbre influye asimismo el espesor del tubo.

➤ **SONIDO GRANDE:** Las vastas dimensiones de la catedral londinense de San Pablo crean una reverberación de nueve segundos para su órgano grande, construido en la década de 1690 y renovado sustancialmente en 1872. Los organistas deben aprender a dominar esa prolongación del sonido, pero sin dejar que les distraiga mientras tocan. En el órgano Newberry Memorial de la Universidad de Yale, el registro de bombarda abre unos tubos de 32' (es decir, 32 pies de alto, casi diez metros), que sacuden el edificio a 16 ciclos por segundo. El Gran Organo John Wanamaker, que llena de sonido el gran atrio —tiene siete pisos de altura— de los grandes almacenes Lord & Taylor de Filadelfia, cuenta con 28.500 tubos. No hay otro en el mundo que tenga tantos. En el mayor cabría un pony; el menor mide sólo seis milímetros de alto. El órgano de la Sala de Conciertos Walt Disney, de Los Angeles, inaugurado este verano, pesa 40 toneladas; su estructura de acero soporta más de 100 tubos gigantes, curvos para adaptarse a las paredes. Sus 6134 tubos están sujetos en bases de metal pesado para que aguanten un terremoto.

➤ **EL ORGANO EXPRESIVO:** Consiste en un cuerpo de juegos de tubos encerrados tras una persiana de listones de madera. El sonido de los tubos se percibe amortiguado; pero cuando el organista abre los listones con un pedal, el sonido se eleva en un "expresivo" crescendo.




**4. LA VALVULA** se abre cuando se oprime una tecla. El orificio abierto en el secreto para que entre la varilla está sellado por un pequeño contrapeso de plomo con la base forrada de fieltro. Cuando se suelta una tecla, un muelle cierra la válvula, que es silenciada mediante un forro de fieltro y sellada por una junta de cuero.

**5. LOS TUBOS FLAUTADOS,** o de embocadura (*izquierda*), son huecos; cuando el viento asciende, procedente de la válvula abierta, incide en el labio y pone a vibrar el aire ambiente. Así se crea el sonido. El reglaje musical se consigue con un manguito móvil situado en el extremo superior. En los tubos de lengüeta (*derecha*), el sonido se genera por el viento que hace vibrar una lengüeta, que transfiere su vibración al aire del resonador. El alambre de afinación, que toca la lengüeta, permite reglar el tono, como un dedo sobre una cuerda de violín. Los tubos de lengüeta pueden ser cuadrados, circulares o cónicos. Los tubos flautados tienden a emplearse para los timbres de órgano (diapasón, principal), flauta y cuerda, los de lengüeta para trompas y clarinetes. Para una misma nota, los tubos cerrados son la mitad de largos que los abiertos. Un tubo abierto de unos sesenta centímetros de largo (desde la boca al extremo superior) produce un Do medio (261,6 hertz).

# LIBROS

## Vida

*Origen y desarrollo*

LIFE'S ORIGIN. THE BEGINNINGS OF BIOLOGICAL EVOLUTION. Dirigido por J. William Schopf. University of California Press; Berkeley, 2002.

ON THE ORIGIN OF *PHYLA*, por James W. Valentine. The University of Chicago Press; Chicago, 2004.

WHOSE VIEW OF LIFE? EMBRYOS, CLONING AND STEM CELLS, por Jane Maienschein. Harvard University Press; Cambridge, 2003.

EMBRIOLOGY, EPIGENESIS, AND EVOLUTION, por Jason Scott Robert. Cambridge University Press; Cambridge, 2004.

Las dos cuestiones centrales de la biología, qué es la vida y cómo se despliega, persisten abiertas. Ni siquiera disponemos de una definición canónica de la vida. Unos remiten a la combinación de un conjunto particular de sustancias químicas; otros hablan de un sistema, altamente ordenado y complejo, de procesamiento de la información; y los hay que apelan sin más a la estructura celular. Casi todos afirman, sin embargo, que la transición de lo inerte a lo vivo es un *continuum*, Y se ha avanzando en la búsqueda de los hitos decisivos.

Se sabe que la nucleosíntesis de los elementos biogénicos —carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo— se produjo en el interior de estrellas remotas. A esos elementos fundamentales habría que agregar diversos iones metálicos (magnesio, hierro, zinc), que son componentes críticos de pigmentos vitales (clorofilas y citocromos) y numerosas enzimas. De cuanto se conoce sobre las condiciones para la aparición de la vida trata *Life's Origin*, que incluye uno de los últimos trabajos de Juan Oró, científico español recientemente fallecido y experto en química prebiótica. La historia se remonta, en efecto, miles de millones de años y culmina con la protoformación celular.

Los procesos tectónicos, metamórficos y erosivos han borrado los vestigios de las primeras manifestaciones de vida. ¿Podemos reconstruir las condiciones presumibles de su aparición? La primera prueba experimental llegó en 1952, en el laboratorio de Harold Clayton Urey. En el marco de su programa de investigación sobre el origen del sistema solar, Urey supuso que la atmósfera primitiva de la Tierra era rica en hidrógeno y, por ende, reductora. En un experimento diseñado para simular ese escenario reductor constituido por $CH_4$, $NH_3$, $H_2O$ y $H_2$, Stanley Miller obtuvo, un año después, la primera síntesis prebiótica de un aminoácido. Andando el tiempo se crearon más aminoácidos, ácidos alifáticos, urea y otros. (En 1960 Oró logró la síntesis abiótica de adenina.)

Nuestro planeta incipiente no disponía de enzimas ni de la energía que permiten a las células fabricar polímeros mediante la adición de monómeros. Además, la formación de polímeros comporta eliminar moléculas de agua, lo que no podía acontecer en pleno océano primitivo. Para superar ese escollo se admite que tal ensamblaje se realizaría sobre partículas de arcilla, sedimentadas en los márgenes de lagunas someras. Un ulterior salto decisivo debía estribar en la síntesis de moléculas portadoras de información. Lo que entendemos por gen. De acuerdo con el guión actual, el mensaje de la vida, cifrado en ADN, se transcribe en ARN, que porta la información para la síntesis citoplasmática de enzimas y otras proteínas. No cabe imaginar ese esquema depurado en los comienzos de la vida. Conocemos además que el ADN es progenie evolutiva de polímeros de ARN, establecidos con anterioridad. Con otras palabras, hubo un mundo previo de ARN, en el que este ácido nucleico constituía el único medio de información y mediaba la catálisis de su propia replicación.

Ahora bien, el ARN no podría haber acometido sus funciones sobre una tierra inerte a menos que abundara el azúcar ribosa, uno de sus constituyentes, concentración entonces harto improbable. El sistema de ARN debió partir, pues, de una forma precedente de vida. Ignoramos cuál pudo ser. En cualquier caso, todo sistema vivo se caracteriza por una serie de propiedades, entre las que destacan dos nucleares: su capacidad de evolución adaptativa y su capacidad de reproducción. Se basaría en la química del carbono. Si la vida se apoyara en el silicio, el proceso produciría dióxido de silicio cristalino ($SiO_2$), que, en vez, de desprenderse a la atmósfera, se acumularía; no habría lugar a ningún ciclo biológico.

El registro fósil sólo atestigua que la vida microbiana floreció hace unos 3500 millones de años. Desde entonces evolucionaría con sorprendente celeridad. En el despliegue inicial cumplió un papel único el núcleo, cuya aparición abrió el paso a la gran diversidad de vida multicelular. El núcleo de la célula eucariota consta de una membrana de bicapa lipídica atravesada por miles de poros (complejos proteínicos), que regulan el tráfico molecular. La cuestión del origen del núcleo se halla íntimamente ligada a la cuestión de nuestro propio origen. ¿De dónde deriva? En las bacterias, el ADN, ARN y proteínas operan conjuntamente en el espacio principal de la célula; allí, en cuanto el código de ADN se transcribe en ARN, las proteínas de los

alrededores comienzan a traducir ese ARN en una nueva proteína. Pero la doble membrana nuclear de las células eucariotas desacopló transcripción y traducción; se logró así un mayor refinamiento del proceso.

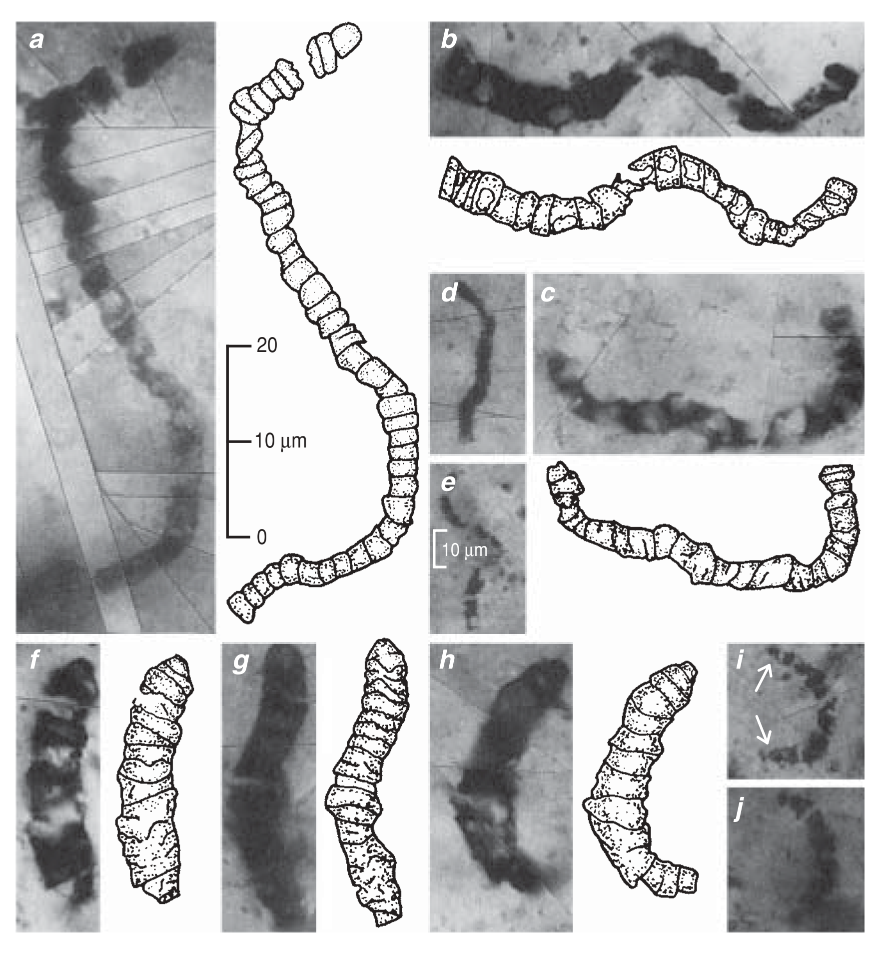
Carl Woese descubrió, en los años setenta, que las "bacterias" constituían dos reinos: las bacterias propiamente dichas y las arqueas, que habrían surgido antes de los eucariotas. El análisis genético inicial indicaba que las arqueas guardaban un parentesco con los eucariotas más estrecho que con las bacterias. Sin embargo, la secuenciación reciente de diversos genomas microbianos ha impreso un nuevo giro a la situación, que pospone el origen de los eucariotas. Estos contienen genes de arqueas y de bacterias. Los genes de arqueas parecen responsables de los procesos relacionados con la información, en los que intervendrían el ADN y el ARN, mientras que los genes bacterianos se encargarían de procesos asociados al metabolismo y subsistencia. De ese antañón compromiso simbiótico entre arqueas y bacterias provendrían los eucariotas.

Para otros autores, los acontecimientos siguieron un curso distinto. Hubo eucariotas antes de que aparecieran bacterias y arqueas, o emergieron contemporáneamente. Apoyan su propuesta en los planctomicetes, un grupo de bacterias, dotadas de núcleo, o algo parecido a ello. Estos supuestos precursores de los eucariotas poseen finas membranas internas que encierran compartimentos; en particular, los planctomicetes *Gemmata obscuriglobus* y *Pirellula marina*. En uno de esos compartimentos, sito en el centro del microorganismo, se aloja el material genético mezclado con proteínas procesadoras de ADN y de ARN. No habría existido, en consecuencia, un origen simbiótico del núcleo, sino que éste se remontaría hasta el primer precursor común universal, un organismo putativo a partir del cual emergieran eucariotas, bacterias y arqueas.

Con mayor radicalidad se manifiestan los partidarios del origen vírico del núcleo, una tercera opción. Declara ésta que los virus precedieron a la divergencia de los tres dominios de la vida. Pone, además, el énfasis en las semejanzas entre virus y núcleos; en esencia, los virus son paquetes de ADN envueltos por una cubierta proteica y, a menudo, por una membrana. Presentes ya en la sopa primordial, sólo más tarde se convirtieron en dependientes de las células para sobrevivir. Las células pudieron adquirir un genoma vírico completo en cualquier momento.

Cualquiera que sea el origen de los eucariotas, hace unos 500 millones de años la vida experimentó cambios profundos. En apenas diez millones de años, las especies marinas se diversificaron en un espectacular repertorio de formas y adaptaciones. Surgieron la mayoría de los grandes linajes animales actuales, vertebrados incluidos. Cada uno de esos linajes o *phylum* corresponde a un plan de organización particular (*On the Origin of Phyla*). Nos referimos a la explosión del Cámbrico, aunque en puridad ni se trató de ninguna explosión, ni sucedió en el Cámbrico. La metáfora se basa en que los fósiles aparecieron en rocas cámbricas, que datan de hace 520 millones de años y que alojan representantes de los grandes grupos de animales. Pero la velocidad de cambio calculada en las secuencias proteínicas y de ADN calibradas para esos fósiles establece las divergencias de los grandes grupos en un tiempo muy anterior al Cámbrico. Tal vez los iniciadores de esos linajes fueron animales pequeños y de cuerpo blando, razón que explicaría la escasez del registro fósil.

Inspirado su título, y su contenido, en *On the Origin of Species* de Darwin, James Valentine ha escrito una obra magistral. Paleontólogo de profesión, reconstruye la evolución de los metazoos a partir de la investigación morfoanatómica de especímenes fósiles y vivos, sistemática molecular y biología del desarrollo. Presta especial atención a los patrones de los clados en el




1. Microfósiles de hace unos 3500 millones de años, hallados en Australia. *Primaevifilum amoenum* (*a-e*); *Primaevifilum conicoterminatum* (*f-j*).

curso de su dispar ramificación en respuesta a distintos entornos.

En los planos corporales de los *phyla* se ejemplifica la combinación perfecta de forma y función. Con la elegante sencillez de los diseños básicos, resulta no menos asombrosa la plural diversificación de estructuras y tipos, instada por la selección natural. Se nos van manifestando de la mano de un triple avance espectacular. En primer lugar, el refinamiento de técnicas moleculares de reconstrucción filogenética, que complementan las tradicionales observaciones morfológicas y aportan datos fiables para reconstruir el parentesco entre metazoos. *Phyla* considerados antaño próximos en su parentesco constituyen en realidad linajes muy distantes.

En segundo lugar, hemos asistido a una progresión en el descubrimiento, descripción e interpretación de los primeros metazoos fósiles. Conocemos así que la mayoría de los *phyla* emergieron en una estrecha franja temporal, la de explosión del Cámbrico, prolífica en especímenes fósiles. El tercer avance nos remite a la genética del desarrollo, que nos faculta para entender las bases moleculares de los planos corporales. Existen series similares de genes reguladores que controlan patrones de expresión con arquitecturas muy dispares (nemátodos, insectos y mamíferos, por ejemplo). Esos genes reguladores apenas si han cambiado en el curso de la evolución.

Los fundamentos modernos de la clasificación los estableció, a principios del siglo XIX, Georges Cuvier con la identificación morfológica de sus cuatro *embranchements* fundamentales: Vertebrados, Moluscos, Articulados (anélidos y artrópodos) y Zoófitos (equinodermos, cnidarios y casi todo lo demás). Karl von Baer halló que la misma tetrapartición podía reconocerse de acuerdo con los criterios de desarrollo. En la segunda mitad de esa centuria, Ernst Haeckel introdujo el término *phylum* para designar una división principal del reino Animalia.

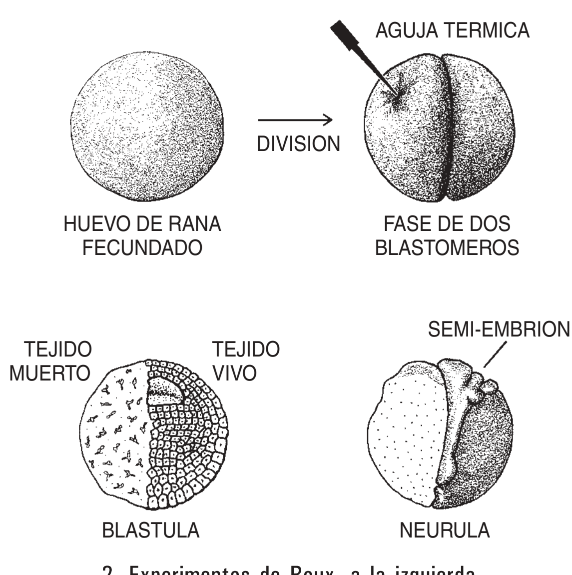
Para determinar la estructura dendriforme de la clasificación jerárquica actual se recurre al cladismo. En los árboles filogenéticos resultantes, la posición de una especie (o de otro taxón) depende de sus antepasados y descendientes, no de la morfología *per se*. Sólo los clados que incluyen todos los descendientes del clado ancestro se consideran taxones genuinos. Los hitos más fácilmente identificados de un dendrograma son los nodos o puntos de ramificación. Conviene, en la tarea, no confundir homologías con analogías. Se denominan homólogos los rasgos similares en organismos o taxones distintos que han evolucionado a partir de un mismo rasgo ancestral y deben su semejanza a la herencia común (extremidades anteriores de perros y lagartos, por ejemplo); análogos son los rasgos similares que cumplen una función similar (alas de aves y murciélagos), aunque no partieron de un rasgo ancestral común, sino que lo han adquirido de manera independiente.

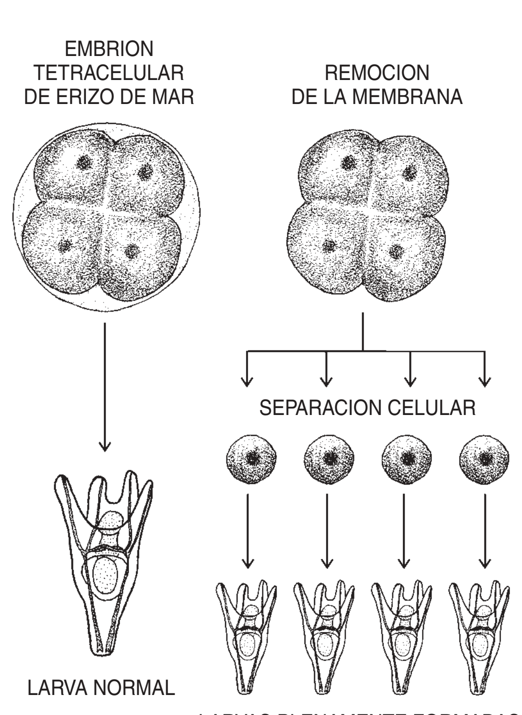
Cuando del hombre se trata la cuestión genérica del origen de la vida y de sus formas pasa a ser el origen de una vida y el desarrollo del embrión (*Whose View of Life? Embryos, Cloning and Stem Cells* y *Embriology, Epigenesis, and Evolution*). Maienschein, reconocida experta en la protohistoria de la biología estadounidense, es asesora del Partido Demócrata en asuntos relacionados con la procreación, clonación y terapia génica. Su libro constituye, en su propósito no explícito, un alegato que busca en la historia de la embriología la justificación de las tesis de la formación política en que milita. Loable empeño, si no cayera en el maniqueísmo que consiste en tildar de vociferantes, extremadas, dogmáticas, religiosas y absolutistas las posturas discrepantes de la suya. Es una argucia retórica, común en nuestros pagos, que consiste en descalificar al oponente con frases gruesas y negarle que se base escuetamente en los derechos del *nasciturus*, por mencionar un ejemplo; con apelaciones a la ciencia, se silencia que el antagonista habla desde la genética y desde la razón *tout court*.

Vale, no obstante, la pena hacer abstracción de esos largos párrafos políticos y cerner el grano. Su tesis: el enfrentamiento actual constituye la reiteración enésima de una visión opuesta sobre el instante inicial de una vida y su posterior desenvolvimiento. Unos defienden que el individuo está ya en el momento de la concepción; son los preformacionistas. Otros, epigenistas, sostienen que la individualidad se adquiere poco a poco, a través de fases funcionales distintas. Empieza con Aristóteles, en el siglo IV a.C. Al estagirita le debemos la primera interpretación gradualista del comienzo de la vida. La generación implica, por definición, cambio en el tiempo; en la humana, el proceso mezcla los "fluidos seminales" del padre y la madre. La mujer aporta con el flujo menstrual la causa material, auténtica masa a partir de la cual se formará el feto, pues el varón sólo induce el estímulo para su desarrollo dinámico ulterior. No existe en un comienzo el individuo *in toto*, sino que cada parte da origen a otras partes, en un proceso teleológico para convertir en acto el potencial.

Con matices la exposición aristotélica, epigenética, se integrará en el pensamiento medieval. Los siglos XVI y XVII trajeron un renovado entusiasmo por el estudio empírico de la naturaleza viva. Andrés Vesalio protagoniza el despegue de la disección anatómica. Al no poder intervenirse en el sujeto, de lo observado en los animales se conjeturaba lo que acontecía en aquél, completado con el conocimiento adquirido en el examen de los abortos y de especímenes teratológicos. William Harvey estudió la generación de los animales. Para sus *Exercitationes de generatione animalium*, de 1615, disecó ciervas tras la copulación y examinó huevos de pollo incubados. No observó ni semen femenino, ni mezcla de fluidos seminales. Del *primordium* descubierto en la cierva preñada (en realidad el saco amniótico) y del huevo empollado emergían, gradualmente, los distintos órganos. Creía que había una fuerza formativa, vital, que guiaba ese paulatino desarrollo. No todos los epigenistas del siglo XVII fueron, sin embargo, vitalistas. René Descartes y Pierre Gassendi expusieron mecanismos materialistas.

En el bando preformacionista militó Nicolas Malebranche con su famosa idea del *emboitement*. Los partidarios se dividieron entre animalculistas (la forma reside en el




2. Experimentos de Roux, a la izquierda, y de Driesch, a la derecha

esperma y se transmitía a través del mismo) y ovistas (la contribución femenina aportaba la forma, a través del óvulo). La primitiva instrumentación microscópica parecía avalar esa tesis con la supuesta observación de homúnculos en los espermatozoides. Marcello Malpighi, el mejor embriólogo del siglo XVII, ideó una técnica muy habilidosa para ir eliminando el material nutritivo del huevo de ave y percibir así partes sutiles del mismo; creyó que el embrión se formaba en el momento de la fecundación.

En el siglo XVIII la polémica se polarizó en torno a Caspar Friedrich Wolff, epigenético, y Charles Bonnet, preformacionista, tesis esta última que defendió también Albrecht von Haller. Los métodos disponibles mejoraron con el proceso de fijación ideado por Mauro Rusconi: los huevos hervidos en distintas fases del desarrollo retenían el despliegue embrionario. Sin embargo, el hito decisivo llegó con la teoría celular y el refinamiento de las técnicas microscopistas, en el primer tercio del siglo XIX. En 1834, von Baer describió los estadios incoativos del desarrollo del huevo de rana: se producía un surco, somero primero y luego más hondo, dividiendo el huevo en dos partes, después en cuatro, etcétera. Von Baer considera así refutado el preformacionismo. Mediado el siglo XIX la teoría celular culminó con los trabajos de Robert Remak y Rudolf Virchow: las células, que se dividían por partición, procedían sólo de otras células. Por fin, George Newport describía el tránsito de los espermatozoides a través de la cubierta gelatinosa y de la membrana vitelina que rodea al huevo de la rana.

Los pasos subsiguientes en las postrimerías del siglo XIX se hallan en los manuales de embriología. Dominio de los microtomos para obtener cortes más finos e invención de métodos de fijación y tinción. Oscar Hertwig y Hermann Fol aprehendieron el estadio de fecundación, con dos núcleos. Theodor Boveri descubrió que los fragmentos que se iban a dividir eran los que portaban un juego completo de cromosomas. Quedaba claro que la diferenciación y la formación del embrión arrancaban del huevo fecundado. Pero la embriología experimental, iniciada con Wilhelm His, Eduard Pflüger y Gustav Born, alcanzó su madurez con Wilhelm Roux, quien en 1895 fundó la revista *Roux's Archiv für Entwicklungsmechanick der Organismen*, equilibrada en 1903 con otra de tintes menos personalistas, el *Journal of Experimental Biology*.

Roux y Hans Driesch se ciñeron al estudio de las fases subsiguientes a la primera división celular (blastómeros); Roux trabajó con ranas y Driesch con erizos de mar. ¿Qué sucedía si separaban las dos células y se sacrifica una? En 1888 Roux descubrió que la célula remanente se desarrollaba con normalidad, al menos hasta el estadio de gástrula, que él interpretó como un semi-embrión. Ello significaba que las causas del desarrollo se hallaban, desde el inicio, en el óvulo fecundado. Desarrollo y diferenciación dependían de factores internos y del determinismo heredado, no de la respuesta ante un entorno cambiante. Roux defendió una versión del preformacionismo conocida por desarrollo en mosaico, según la cual los materiales nucleares se transformaban en diferentes células hijas durante la división celular.

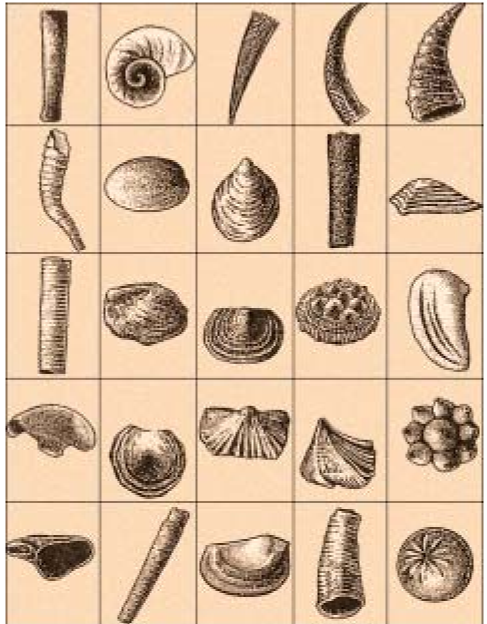
Driesch esperaba confirmar los resultados de Roux en la Estación Zoológica de Nápoles, donde abundaban los erizos de mar. Mas, para su sorpresa, comprobó que cada blastómero producía dos, luego cuatro células, hasta desarrollarse en una forma larvaria normal, aunque de menor tamaño. No operaban en mosaico, sino como un todo reorganizado; cada blastómero era, según acuñó, "totipotente". En vez de convertirse en una parte diferenciada del organismo, el blastómero estaba capacitado para regular su desarrollo y producir un organismo entero.

A finales del siglo XIX la partenogénesis ofrecía otro reto a las interpretaciones establecida sobre cómo opera la vida. Centrándose en las primeras divisiones celulares, Jacques Loeb modificó las condiciones externas. Colocó huevos de erizo fecundados en una solución muy salina y luego los devolvió al

medio marino. Mientras estaban en la solución salina, parecían en reposo; cuando los devolvía a las condiciones normales, se dividían en gran número de blastómeros con suma rapidez. Alcanzaban los estadios de blástula, gástrula e incluso la fase larvaria pluteus. Loeb infirió que, durante el período de reposo, los núcleos se habían estado dividiendo y preparando para la división celular e incluso para la diferenciación. En su opinión, el proceso de la fecundación había pasado del reino de la morfología al reino de la química. La activación del óvulo se reducía a la fisicoquímica. La vida comenzaba y concluía con un ciclo de oxidación.

La investigación fue más allá de las primeras divisiones celulares y estadios precoces del desarrollo (mórula, blástula, gástrula, etcétera). En el primer tercio del siglo XX, se experimentó con trasplantes de tejidos de un embrión a otro. La fracción trasplantada parecía arrastrar consigo buena parte de su especificidad, aunque a veces las células se adaptaban al nuevo entorno. ¿Qué factor inducía el desarrollo y la diferenciación? Tras los trabajos de Hilde Mangold se llegó a la conclusión de que el labio dorsal del blastoporo inducía la diferenciación del organismo. Declaración a la que se puso sordina cuando Johannes Holtfreter demostró que había otras estructuras dotadas también de idéntica capacidad.

Los últimos cincuenta años han avanzado sobre los raíles de la genética molecular. Veinte años después del descubrimiento de la estructura helicoidal del ADN, se sabía ya cómo aislar una enzima de restricción que podía cortar segmentos del ácido nucleico por determinadas zonas. Se aprendió pronto a aislar una ligasa, capaz de engarzar porciones segmentadas. Con la técnica del ADN recombinante, la biología planteaba un reto a la noción de vida. Si la de un individuo se define en función del material heredado y se expresa a través del desarrollo embrionario, ¿habría que modificar tal definición cuando recombinamos el ADN? ¿Estamos redefiniendo la vida o rediseñándola? ¿Qué es la vida? ¿Qué es una vida?



3. Fósiles de la plataforma siberiana.

Con la secuenciación y posibilidades de manipulación del genoma humano las preguntas se tornan más acuciantes. (A propósito de la legislación que tales cuestiones han urgido, el lector sacará provecho de *El destino de los embriones congelados*. Unidas por un mismo rigor científico las diversas colaboraciones que componen el libro, importa destacar la claridad expositiva de Mónica López Barahona sobre los distintos tipos de células troncales [células madre], quien se esfuerza, además, en compilar los numerosos trabajos realizados con células adultas.)

Con *Embriology, Epigenesis, and Evolution* tornamos al problema del desarrollo, desde una perspectiva holística. Para Roberts no viene éste determinado en exclusiva por la acción y regulación génica. De hecho, entre el genoma secuenciado y el desarrollo de un organismo interpone un abismo. Más: los genomas resultan impensables fuera de los organismos complejos de los que forman parte, pues los genes no operan por sí solos; actúan en un contexto de desarrollo y deben reproducirse a través de generaciones.

De acuerdo con la interpretación estándar, sin embargo, el genoma heredado inicia y dirige el desarrollo. Pero se trata, objeta el autor, de una tesis errónea. En el desarrollo encontramos bastante más que la mera activación de los genes. De entrada conviene distinguir entre tener en cuenta el desarrollo y tomarse en serio el desarrollo. Por lo segundo entiende no refugiarse tras metáforas que atribuyen poderes mágicos a los genes: "instruyen" y "programan" el organismo futuro. Antes bien, importa explorar con pormenor los procesos y los mecanismos de diferenciación, morfogénesis y desarrollo, así como las funciones reales de los genes en las actividades del organismo. Se opone al "consenso interaccionista", según el cual todos estarían de acuerdo en que genes y entorno "interactúan" en la generación (y explicación) de los caracteres del organismo. En términos epistemológicos, el *explanandum* es el desarrollo planteado en el contexto de la genómica. El problema central de la embriología —cómo un organismo complejo emerge de una célula homogénea— no se resuelve con los genes. La interpretación de la acción y la activación se limita a dar cuenta del papel de los genes en el desarrollo, pero no aborda el problema del desarrollo en cuanto tal.

La comprensión del desarrollo se hace, además, imprescindible, para entender la evolución. *Astymax mexicanus*, un pez de México nororiental, vive en ríos y en cuevas subterráneas. A lo largo de millones de años y, entre otros cambios evolutivos, los individuos que moran en las cavidades se han vuelto ciegos, mientras que los que viven en cursos abiertos presentan grandes ojos. Los primeros han perdido incluso pigmentación, no así éstos. La pérdida de ojos se debió a una interrupción de la vía del desarrollo en un punto específico; puede restañarse suministrando una señal en el momento y tiempo adecuados, porque no han perdido la capacidad de desarrollar los ojos. El conocimiento de la biología del desarrollo ayuda, pues, a completar la evolución de los dos morfos del pez. Los genes, concluye Roberts, desempeñan un papel derivado, no determinante. El organismo constituye la unidad básica del desarrollo.

—LUIS ALONSO




# EN EL PROXIMO NUMERO... ...DE DICIEMBRE 2004



## EL CONTROL DE LOS HURACANES, por Ross N. Hoffman

¿Se pueden moderar o desviar los huracanes y otras formas de tempestad tropical?

## EL PROGRAMA GENETICO OCULTO DE LOS ORGANISMOS COMPLEJOS, por John S. Mattick

Se creía que en la regulación de los genes de los organismos complejos sólo intervenían proteínas. Sin embargo, un sistema regulador hasta ahora desconocido, basado en el ARN, podría encerrar las claves del desarrollo y la evolución.



## UN UNIVERSO DE DISCOS, por Omer Blaes

Nuevas investigaciones han descubierto la dinámica de los discos de gas que giran alrededor de estrellas jóvenes y gigantescos agujeros negros.

## ORION, por César Briceño Avila

Los sondeos del cielo nocturno con detectores digitales panorámicos están revolucionando la astronomía. Desde los Andes venezolanos, un gran “ojo electrónico” contribuye a develar las primeras fases de la vida de las estrellas.

## EL CRISTALINO, UNA LENTE FLEXIBLE DEL OJO HUMANO, por Ralf Dahm

La investigación del cristalino del ojo quizá nos enseñe formas de prevenir las cataratas mientras ilumina la biología del Alzheimer, del Parkinson y de otras enfermedades neurodegenerativas.

